

**Treball de Fi de Màster**

**Màster en Enginyeria de l'Energia**

**Vehicle elèctric i qualitat de l'aire**

**MEMÒRIA**

**Autor:** Carles Pitarch Casas  
**Director:** César Valderrama  
**Convocatòria:** Juny 2019



**Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona**



## Índex del Treball Final de Màster

<b>Introducció .....</b>	<b>4</b>
<b>Problemàtica.....</b>	<b>4</b>
<i>Impacte de la contaminació en la salut.....</i>	<i>4</i>
<i>Impacte de la contaminació en el medi ambient.....</i>	<i>8</i>
<i>Impacte de la contaminació en l'economia .....</i>	<i>10</i>
<i>Causes de la contaminació atmosfèrica .....</i>	<i>11</i>
<i>Com reduir la contaminació atmosfèrica .....</i>	<i>12</i>
<b>Objectius i abast.....</b>	<b>13</b>
<b>Estat de l'art i antecedents .....</b>	<b>13</b>
<i>Mesures a la Unió Europea per millorar la qualitat de l'aire .....</i>	<i>13</i>
Vehicles de combustió més nets .....	21
Aposta pel vehicle elèctric.....	25
<b>Metodologia .....</b>	<b>33</b>
<i>Model de dispersió ADMS-Urban .....</i>	<i>33</i>
Descripció.....	33
Limitacions del model .....	39
<i>El procés de modelització .....</i>	<i>39</i>
Informació d'entrada necessària (inputs).....	39
<i>Escenaris d'estudi.....</i>	<i>50</i>
Determinació del parc mòbil futur .....	52
<i>Inventari d'emissions.....</i>	<i>53</i>
<i>Configuració de sortida del model.....</i>	<i>54</i>
<i>El procés de simulació i obtenció de resultats .....</i>	<i>54</i>
<b>Inventari d'emissions detallat .....</b>	<b>55</b>
<i>Mobilitat per tipologia de vehicle i subcategoria.....</i>	<i>55</i>
<i>Escenari Base .....</i>	<i>57</i>
Circulació viària .....	57
Emissions de NO <sub>x</sub> i PM <sub>10</sub> .....	58
<i>Escenari MIDxEV. ....</i>	<i>59</i>
Circulació viària .....	59
Emissions de NO <sub>x</sub> i PM <sub>10</sub> .....	60
<i>Escenari Sense Etiqueta Groga.....</i>	<i>61</i>
Circulació viària .....	61
Emissions de NO <sub>x</sub> i PM <sub>10</sub> .....	62
<i>Comparativa d'emissions dels tres escenaris.....</i>	<i>63</i>
<b>Resultats de la modelització.....</b>	<b>63</b>
<i>Mapes d'immissió mitjana anual .....</i>	<i>63</i>
<i>Immissió a diversos punts del domini de modelització .....</i>	<i>68</i>

<i>Temps de simulació.....</i>	<i>73</i>
Impacte econòmic de la contaminació atmosfèrica al domini de modelització .....	74
Conclusions.....	81
Agraïments .....	83
Referències.....	84

## Introducció

La contaminació de l'aire és un problema tant gran com invisible; una amenaça global que crea un gran impacte a diferents nivells (perjudica a la salut de les persones i del medi ambient, també a l'economia...). Des de l'inici de la Revolució Industrial (finals del segle XIX), les emissions i conseqüentment les immissions s'han incrementat de forma important a moltes regions del planeta. Sobretot a les grans ciutats, on la complexa orografia urbana dificulta la dispersió dels contaminants [1]. Degut a l'envergadura que aquest problema està agafant, cada vegada és més important monitoritzar la contaminació als territoris per tal de tenir més marge de maniobra sobre ella; per aquest fi, s'utilitzen models de dispersió per fer prediccions en escenaris de futur. De fet, una de les claus per combatre la contaminació atmosfèrica és reduir les emissions d'un dels seus grans contribuents: el trànsit. El vehicle elèctric no és la panacea, però pot aportar el seu gra de sorra a les emissions del sector del transport rodat. Aquest treball integra la contribució del vehicle elèctric a la millora de la qualitat de l'aire als territoris urbans.

## Problemàtica

El fenomen de la contaminació atmosfèrica no és nou. De fet, sempre ha anat de la mà del creixement econòmic, generada per la producció i el consum [2].

Aquesta problemàtica se sustenta en la seva major part en l'encara molt important dependència dels combustibles fòssils per part de les economies mundials (i sobretot aquelles que es troben en vies de desenvolupament). Si bé és cert que els països més desenvolupats estan fent esforços per reduir les emissions contaminants, hi ha altres on aquesta reducció no s'està donant en els mateixos termes [2]. Els països es volen assegurar que el seu compromís amb el medi ambient sigui compatible amb el seu creixement econòmic, fet que provoca que les mesures que adopten per reduir la contaminació no siguin suficientment ambicioses per plantar cara al problema de forma decidida [3].

La contaminació afecta sovint de forma desigual als diferents estrats socials de la societat, provocant injustícia ambiental. Així doncs, aquelles persones amb baix poder adquisitiu disposen de menys recursos per disminuir l'impacte que la contaminació crea a les seves vides, sobretot en països pobres o en vies de desenvolupament [2].

La pol·lució de l'aire provoca un impacte a diversos àmbits del món on vivim. Es descriuen en els següents apartats.

### Impacte de la contaminació en la salut

La contaminació atmosfèrica encapçala la llista de factors de risc per a la salut de les persones a nivell global. Prop de 6,5 milions de persones moren **prematurament** al món per insuficiències cardíaques i respiratòries, càncer de pulmó i infeccions respiratòries [4] degudes a la pol·lució de l'aire. També hi ha evidències que l'exposició a contaminació severa està relacionada amb nous casos de diabetis tipus 2, obesitat, Alzheimer i demència, entre d'altres [2].

La pol·lució de l'aire ja representa la quarta causa més important de morts prematures al món [5] i ja és comparable amb les causes "tradicionals" de mortalitat com són el tabac, el colesterol i la hipertensió. Segons l'Organització Mundial de la Salut (OMS), l'aire que

respiren 9 de cada 10 persones al món es troba per sobre dels valors recomanats per l'OMS [6]. L'impacte negatiu a la salut afecta a persones de totes les edats, tot i que ho pateixen especialment els col·lectius vulnerables com són els ancians, embarassades, nens i discapacitats. En relació als infants, es calcula que aproximadament 2.000 milions de nens estan exposats a nivells superiors als recomanats per l'OMS, mentre que 300 milions d'ells viuen en zones amb nivells de fins a 6 vegades superiors als establerts per aquesta institució [2]. De fet, aproximadament 4,3 milions de persones moren prematurament al món a causa d'una qualitat de l'aire domèstic pobre; sobretot es tracta d'un fenomen propi dels països subdesenvolupats [2], on la crema de combustibles de baixa qualitat (sòlids i líquids) dins dels immobles i la mala gestió de residus repercuteixen negativament en la qualitat de l'aire a nivell local [7].

A Europa, la qualitat de l'aire es manté pobre a moltes zones del continent, tot i que millor que a altres regions subdesenvolupades d'Àsia, Àfrica i Amèrica. Els ciutadans europeus perceben la contaminació atmosfèrica com la segona preocupació ambiental més gran després del canvi climàtic [4]. És per això que esperen mesures per part de les institucions de govern per solucionar el problema.

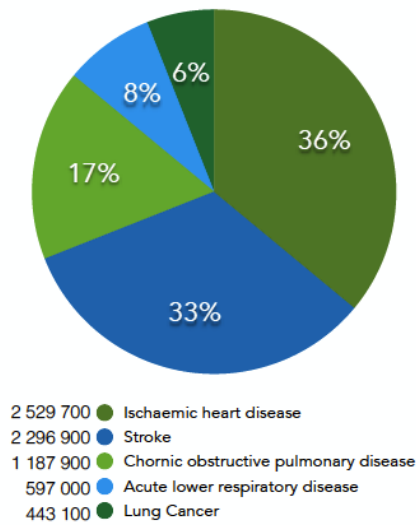
A nivell europeu, segons l'Agència Europea del Medi Ambient, a Europa es produïen l'any 2014 aproximadament unes 78.000 morts prematures per excés de  $\text{NO}_2$ , 428.000 morts prematures per excés de  $\text{PM}_{2,5}$  (partícules encara més fines que les  $\text{PM}_{10}$  i més perjudicials per la salut) i 14.400 morts prematures per exposició a ozó troposfèric (també anomenat "ozó dolent") [1].

Pel que fa a Espanya, el total de víctimes prematures per contaminació l'any 2014 es xifrien en un total de 30.000 persones: 6.740 per  $\text{NO}_2$ , 23.180 per  $\text{PM}_{2,5}$  i 1.600 per  $\text{O}_3$ . Són xifres alarmants i més tenint en compte que gairebé dupliquen els valors de l'any 2004, on s'estimaven un total de 16.000 morts prematurs per contaminació [8].

I és que tot i que la majoria de contaminants tenen efectes negatius en la salut de les persones, es calcula que les  $\text{PM}_{2,5}$  tenen molta responsabilitat en les defuncions prematures degudes a la pol·lució de l'aire [1]. Els efectes negatius de l'ozó troposfèric sovint s'obvien degut a la seva confusió amb l'ozó estratosfèric, aquell que ens protegeix de la radiació solar formant una capa a l'estratosfera.

A la següent imatge es mostra la distribució de les morts prematures atribuïdes a la contaminació segons malaltia.

Imatge 1. Morts atribuïdes a la contaminació segons malaltia l'any 2012: Nivell global.



Font: [6] **Ischaemic heart disease:** Infart. **Stroke:** Ictus. **Chronic obstructive pulmonary disease:** Malaltia d'obstrucció respiratòria crònica. **Acute lower respiratory disease:** Malaltia respiratòria aguda. **Lung Cancer:** Càncer de pulmó.

La contaminació que prové de l'aire que respirem pot provenir de dos tipus de contaminants segons el seu origen [9]. Així doncs, es pot parlar de:

- **Contaminants primaris.** Són els contaminants que s'emeten directament a l'atmosfera. Exemples en són el NO, el SO<sub>2</sub>, CO, hidrocarburs, entre d'altres.
- **Contaminants secundaris.** Es tracta d'aquells contaminants que es formen a partir dels contaminants primaris per mitjà de reaccions químiques. Un exemple és l'ozó troposfèric (O<sub>3</sub>), que es forma a partir d'òxids de nitrogen (NO<sub>x</sub>), compostos orgànics volàtils (VOC's) i radiació solar. Per això, les concentracions màximes d'ozó es donen a les hores centrals del dia. A més, paradoxalment, tendeix a acumular-se lluny de la font d'emissió dels seus precursors, afectant més a zones rurals sovint allunyades de les ciutats.  
Un altre exemple de contaminant secundari és el NO<sub>2</sub>, originat per oxidació a partir del contaminant primari NO i l'oxigen present a l'aire.

La següent taula mostra els efectes negatius per la salut que provoquen els contaminants esmentats, així com també d'altres.

Taula 1. Efectes negatius per la salut provocats pels contaminants.

Aire	Impacte humà
<b>Partícules PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub>.</b> Contenen sulfats, nitrats, amoníac, clorur de sodi, hidrocarburs policíclics aromàtics, pols i aigua	Trastorns respiratoris Problemes cardiovasculars Càncer
<b>Carboni negre.</b> Provenent de combustions incompletes i de l'obtenció d'energia per mitjà de combustió	Trastorns respiratoris Problemes cardiovasculars Càncer
<b>Òxids de nitrogen (NO<sub>x</sub>).</b> Provenents de la combustió del transport i obtenció d'energia per mitjà de combustió	Irritació pulmonar
<b>Amoni.</b> Provenent de l'agricultura	Irritació pulmonar
<b>Diòxid de sofre (SO<sub>2</sub>).</b> Provenent de la combustió de combustibles rics en sofre	Mortalitat prematura Danys a les edificacions
<b>Ozó troposfèric (O<sub>3</sub>).</b> Contaminant <b>secundari</b> originat per reaccions fotoquímiques, NO i VOC's	Alteració del sistema immunitari Trastorns respiratoris Problemes cardiovasculars Problemes en el desenvolupament dels nadons durant períodes gestants
<b>Metalls pesants</b> (sobretot plom i mercuri)	Problemes en el correcte desenvolupament neurològic i al sistema nerviós, digestiu, respiratori, immunitari i excretor
<b>Benzè.</b> Provenent dels combustibles i altres derivats del petroli, així com obtenció de dissolvents	Trastorns respiratoris i cardíacs aguts i a llarg termini. També provoca càncer i anèmia

Font: Elaboració pròpia en base a [2]

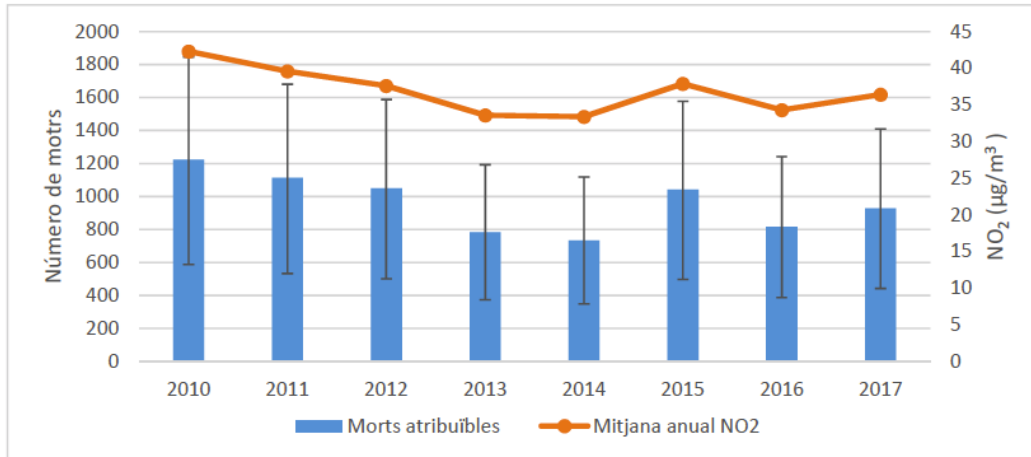
### Com afecta la contaminació als ciutadans de Barcelona

Segons l'Agència de Salut Pública de Barcelona, el 70% de la població de Barcelona està exposada a nivells de NO<sub>2</sub> per sobre els de referència de l'OMS, mentre que en el cas de les PM<sub>10</sub> es tracta d'un 98% de la població [10](2017).

La contaminació deguda al NO<sub>2</sub> va causar gairebé 1.000 morts prematures al 2017 segons l'Agència de Salut Pública de Barcelona [10]. Es pot observar al següent gràfic.

Gràfic 1: Nivells mitjans de NO<sub>2</sub> i mortalitat atribuïble a aquest contaminant a la ciutat de Barcelona.

**Mortalitat atribuïda a superar els nivells anuals recomanats de NO<sub>2</sub> a la ciutat de Barcelona (2010-2017).**  
**Mortalitat total (excloent causes externes) en majors de 30 anys, atribuïbles a la superació de 20 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub> en la mitjana anual. Mitjana anual de NO<sub>2</sub> a les estacions de fons.**

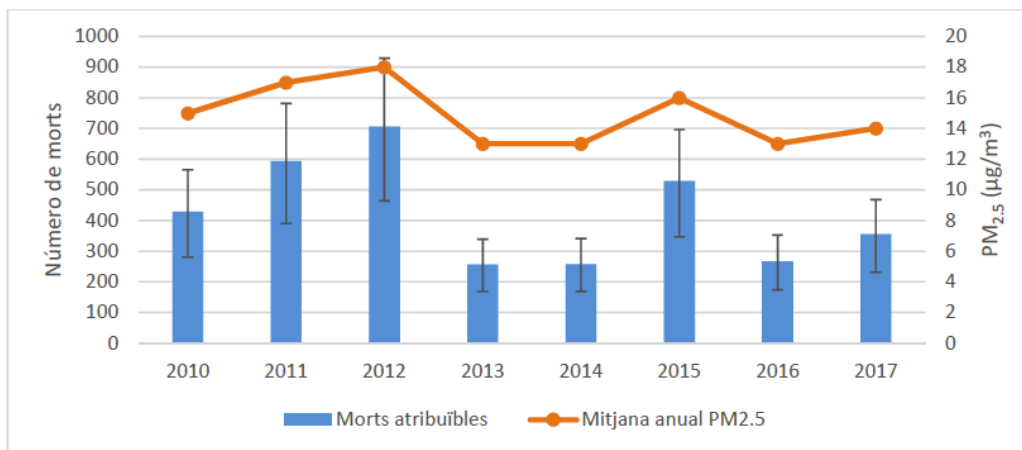


Font: [10].

En el cas de les partícules, unes 350 persones van morir prematurament l'any 2017 degut a un excés de PM<sub>2,5</sub> segons l'ASPB [10]. Es mostra al següent gràfic.

Gràfic 2: Nivells mitjans de PM<sub>2,5</sub> i mortalitat atribuïble a aquest contaminant a la ciutat de Barcelona.

**Mortalitat atribuïda a superar els nivells anuals recomanats de PM<sub>2,5</sub> a la ciutat de Barcelona (2010-2017).**  
**Mortalitat total (excloent causes externes) en majors de 30 anys, atribuïbles a la superació de 10 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2,5</sub> en la mitjana anual. Mitjana anual de PM<sub>2,5</sub> a les estacions de fons de la ciutat.**



Font: [10]

La contaminació atmosfèrica és, doncs, un problema de salut pública a les grans ciutats com Barcelona.

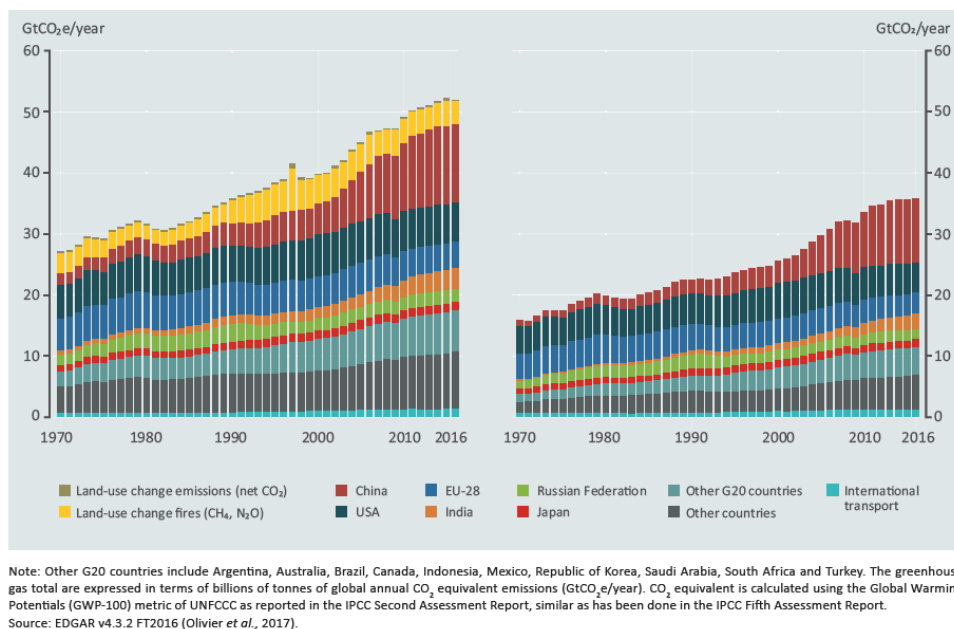
### Impacte de la contaminació en el medi ambient

La contaminació no només afecta a la salut de l'espècie humana; també afecta a la salut dels ecosistemes i als processos físics i químics que es donen a la Terra. Està estretament relacionada amb el canvi climàtic, ja que molts dels contaminants tenen una contribució



destacable a curt termini a l'escalfament global (ozó troposfèric i carboni negre, per exemple). Altres components de les PM contribueixen a la refrigeració de l'atmosfera [1]. Els canvis en els patrons meteorològics deguts al canvi climàtic afecten al transport, dispersió i formació d'altres contaminants a l'atmosfera. L'augment de la temperatura pot incrementar les emissions de compostos volàtils orgànics (VOC's) d'origen biogènic (zones boscoses). Tal i com ja s'ha esmentat abans, els VOC's són precursors de l'ozó troposfèric; a la vegada aquest minva l'absorció de CO<sub>2</sub> per part de les plantes [11]. El canvi climàtic és, de fet, un canvi sobtat en els processos terrestres i no naturalment induït; està clarament demostrat que és conseqüència de l'activitat humana. L'enorme quantitat d'emissions de gasos d'efecte hivernacle com el CO<sub>2</sub> (diòxid de carboni) i el CH<sub>4</sub> (metà) estan escalfant el planeta per sobre dels nivells pre-industrials. **Les emissions d'efecte hivernacle totals s'estimaven en 51,9 GtCO<sub>2</sub> eq l'any 2016** [12]. A la següent imatge es mostren les emissions globals de gasos d'efecte hivernacle fins l'any 2016 (gairebé doblen els nivells del 1970).

Imatge 2. Evolució temporal d'emissions de CO<sub>2</sub>eq (Gt) des de l'any 1970 fins a l'any 2016.



Font: [12].

L'acord de París (adoptat l'any 2015) ja va establir un marc d'acció amb l'objectiu de mantenir l'escalfament global per sota dels 2°C respecte nivells pre-industrials. Es pretén aconseguir aquest objectiu donant més eines als països per tractar l'impacte ambiental [13].

A continuació es mostren els efectes negatius que els contaminants originen al medi ambient (impacte ecològic i impacte als serveis ecosistèmics).

Taula 2. Efectes perjudicials pel medi ambient provocats pels contaminants.

Aire	Impacte ecològic	Impacte al servei ecosistèmic
<b>Partícules PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub>.</b> Contenen sulfats, nitrats, amoníac, clorur de sodi, hidrocarburs policíclics aromàtics, pols i aigua	Reducció de la visibilitat  Alteracions en la fotosíntesi	Canvis en la producció de l'ecosistema
<b>Carboni negre.</b> Provenent de combustions incompletes i de l'obtenció d'energia per mitjà de combustió	Reducció de l'albedo i per tant afavoriment de l'escalfament global.  Alteracions en la fotosíntesi	Refrigeració ambiental  Canvis en la producció de l'ecosistema
<b>Òxids de nitrogen (NO<sub>x</sub>).</b> Provenents de la combustió del transport i obtenció d'energia per mitjà de combustió	Acidificació  Eutrofització	Alteració del cicle de nutrients dels ecosistemes
<b>Amoni.</b> Provenent de l'agricultura	Eutrofització	Reducció de la producció d'aliments
<b>Diòxid de sofre (SO<sub>2</sub>).</b> Provenent de la combustió de combustibles rics en sofre	Acidificació	Pèrdua de biodiversitat
<b>Ozó troposfèric (O<sub>3</sub>).</b> Contaminant <b>secundari</b> originat per reaccions fotoquímiques	Reducció del creixement de les plantes i increment de la susceptibilitat a l'estrès	Reducció de producció de biomassa
<b>Metalls pesants</b> (sobretot plom i mercuri).	Acumulació progressiva als organismes de les cadenes tròfiques	Disminueix la disponibilitat d'aliment degut a la contaminació
<b>Benzè.</b> Provenent dels combustibles i altres derivats del petroli, així com obtenció de dissolvents	Alt efecte nociu a les plantes terrestres i als ecosistemes aquàtics	Reducció potencial de la biomassa. Reducció a llarg termini de poblacions marines on hi regeix la contaminació

Font: Elaboració pròpia en base a [2]

### Impacte de la contaminació en l'economia

Un dels altres aspectes a tenir en compte és l'impacte econòmic de la contaminació; impacte econòmic des de el punt de vista dels costos a nivell sanitari, la disminució de la productivitat dels conreus, els danys propiciats a les edificacions, ecosistemes... Segons l'OCDE, les pèrdues econòmiques a nivell europeu se situaran al voltant del 2% del PIB europeu l'any 2060 [14].

Al capítol d'**Impacte Econòmic**, es quantifica l'impacte econòmic de la contaminació provinent dels vehicles que circulen per una regió específica de l'Eixample (cas d'estudi).

Tota la sèrie d'impactes descrits anteriorment han anat a l'alça al llarg del temps i s'estan consolidant com a problemes estructurals en algunes regions i societats. Tot i així, els efectes negatius de la contaminació en l'economia es poden redreçar mitjançant una política de mitigació de la pol·lució efectiva. En canvi, l'impacte a la salut de les persones és un problema més irreversible [2].

### Causes de la contaminació atmosfèrica

La contaminació atmosfèrica pot provenir de diverses fonts, ja siguin derivades de l'activitat humana com biogèniques (directament provinents de la natura). La gran majoria provenen de processos de combustió [1]. S'enumeren a continuació, posant especial èmfasi al sector del transport per la rellevància que té en aquest treball:

- **Transport**

Una de les grans fonts d'emissions contaminants és el sector del transport; les emissions degudes a la mobilitat dels vehicles representen gairebé el 25% de totes les emissions d'efecte hivernacle de tota la Unió Europea. Dins del transport, les emissions del transport rodat per carretera representen el 80% de totes les emissions del transport a Europa [1].

- **Producció i distribució d'energia**

La producció d'energia amb tecnologies de combustió com el carbó o el gas natural evoquen a l'atmosfera quantitats molt importants de gasos contaminants.

- **Sector industrial**

Emissions provinents de la producció industrial (ús d'energia, químics...).

- **Sector comercial i domèstic**

Emissions bàsicament degudes a l'ús de gas natural per cuinar i aigua calenta (emissions procedents de la combustió d'aquest gas).

- **Sector agrari**

L'ús de químics per controlar les plagues i assegurar la bona producció (fertilitzants, pesticides...) evoquen grans quantitats de contaminants (amoníac, per exemple). De fet, la manipulació del sòl per conreu produeix grans quantitats de pols (PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub>).

- **Residus.**

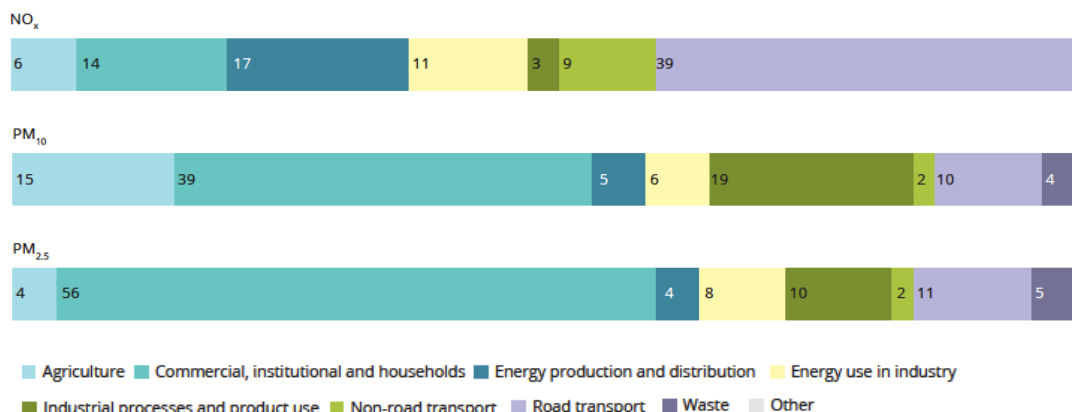
La crema de residus per obtenir energia o simplement eliminar-los genera grans quantitats d'emissions contaminants a l'atmosfera.

- **Biogèniques**

Les plantes retornen bona part del carboni que assimilen a l'atmosfera en forma de compostos orgànics volàtils (VOC's).

La següent imatge mostra la contribució de cadascun dels sectors esmentats en el total d'emissions contaminants de la Unió Europea l'any 2016.

Imatge 3. Contribució dels diferents sectors (en %) a les emissions de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub> primàries a la UE l'any 2016.



Font: [15]

## Com reduir la contaminació atmosfèrica

Per reduir la contaminació atmosfèrica és primordial reduir les emissions contaminants dels diferents actors i afavorir-ne al màxim la dispersió. Cada sector pot contribuir d'alguna manera a la reducció d'emissions per combatre la contaminació. A continuació es mostren un seguit d'accions que pot articular cada sector [2]:

- **Transport:**
  - o Fer de les tecnologies de propulsió convencionals (Gasolina i Dièsel) més netes per mitjà de mecanismes com filtres de partícules i catalitzadors equipats en els sistemes de tractament dels gasos d'escapament. També establint un marc de límits d'emissions pels nous vehicles (normativa EURO).
  - o Apostar amb més força per opcions de propulsió menys contaminants com els **vehicles elèctrics**, híbrids o de gas. També és important assegurar un bon accés energètic a les noves tecnologies (teixir una xarxa de punts de recàrrega per vehicles elèctrics més densa, per exemple) [16].
  - o Mentre el vehicle elèctric no guanya un pes important a la societat, centrar part dels esforços en renovar el parc actual de vehicles: encara hi ha vehicles en circulació molt vells. Si aquests es substitueixen per vehicles de combustió d'última generació (molt més nets) la reducció d'emissions pot ser molt important.
- **Sector energètic:**
  - o Produir electricitat amb energies renovables com la solar, eòlica, hidràulica, geotèrmica... pot evitar una gran quantitat d'emissions contaminants; diversificar la generació elèctrica per augmentar la flexibilitat energètica i reduir així les emissions.
- **Sector agrari:**
  - o Restringir la crema de residus agraris, tot millorant-ne la seva gestió.

- **Sector domèstic, comercial i industrial:**
  - o Reduir el consum energètic i els residus, ja que la seva posterior gestió tindrà menys impacte ambiental i per tant menys emissions.

## Objectius i abast

L'**objectiu principal** d'aquest treball és observar i quantificar l'impacte del sector viari en la qualitat de l'aire d'una regió específica de Barcelona per mitjà d'un model de dispersió de contaminants (ADMS-Urban). En aquest sentit, s'analitza un entramat de carrers de l'Eixample (5x5 illes) en el marc de diversos escenaris del parc circulant, tot partint de dades **reals** de circulació referents a l'any 2017. D'aquesta manera es quantifica l'impacte que té la contaminació procedent únicament del trànsit.

L'objecte d'aquest estudi pren especial rellevància ja que estableix canvis en el parc circulant actual en favor de vehicles menys contaminants, tal i com pretén fer l'Ajuntament de Barcelona a partir de l'any 2020. I és que a partir del gener d'aquest any només podran circular per la zona interior de les Rondes aquells vehicles amb etiqueta ambiental de la DGT (mesures a curt termini). La ciutat es trobarà doncs immersa en un nou escenari pel que fa a la seva mobilitat, fet que ha motivat a aquest estudi a realitzar escenaris encara més ambiciosos (hipotètiques mesures a llarg termini).

Per altra banda, els **objectius específics** d'aquest treball són:

- Modelitzar la qualitat de l'aire a una regió específica de l'Eixample de Barcelona en el marc de tres escenaris del parc viari diferents. S'utilitza el model de dispersió ADMS-Urban.
- Avaluar l'impacte del vehicle elèctric i el seu potencial per reduir les emissions globals del parc circulant.
- Avaluar l'impacte econòmic de la contaminació i la seva potencial reducció a partir dels resultats obtinguts amb la modelització dels tres escenaris analitzats.

## Estat de l'art i antecedents

A l'apartat de problemàtica s'ha presentat a la contaminació atmosfèrica com un dels majors factors de risc per la salut humana, el clima i l'economia. **El sector viari es consolida com un dels sectors més contaminants d'Europa i del món** [1]. Aquest capítol analitza quins efectes té i com s'adreça la problemàtica de la contaminació especialment a Europa, amb especial menció al vehicle elèctric com a participant de la reducció d'emissions del sector del transport. També es fa a referència a Barcelona, ja que la modelització es duu a terme a una regió de l'àmbit d'aquesta ciutat.

### Mesures a la Unió Europea per millorar la qualitat de l'aire

La Unió Europea s'ha proposat reduir les emissions contaminants l'any 2030 com a mínim un 40% respecte els nivells del 1990 i un 60% respecte aquest mateix nivell l'any 2030 [15].

En aquest sentit, la Unió Europea basa la seva lluita a favor de la qualitat de l'aire per mitjà de dues directives clau [17]:

- **Directiva 2008/50/EC**, relativa a la qualitat de l'aire ambient i a una atmosfera més neta a Europa. Aquesta directiva l'adapta cada Estat Membre al seu marc legal. En el cas d'Espanya, s'ha traslladat amb el RD 102/2011 relatiu a la millora de la qualitat de l'aire i la seva última modificació plasmada en el RD 39/2017.
- **Directiva 2016/2284/EU**, relativa als sostres de concentració permessos. Aquesta directiva estableix uns valors llindars de concentració que no s'haurien de superar per als diferents contaminants. Així doncs, els límits d'immissió de NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> i O<sub>3</sub> establerts per la UE i transposats als Estats Membres són (també es presenten els valors recomanats per l'OMS, més restrictius en alguns casos):

Taula 3. Valors llindars de contaminació a la UE.

Contaminant	VALORS LÍMIT EU i RECOMANATS [OMS]	
NO <sub>2</sub>	<u>horari:</u> <b>200 µg/m<sup>3</sup></b> [OMS: 200 µg/m <sup>3</sup> ] <small>[Límit superació permès: 18 vegades l'any]</small>	<u>Mitjana anual:</u> <b>40 µg/m<sup>3</sup></b> [OMS: 40 µg/m <sup>3</sup> ]
	<u>Llindar d'especial alerta:</u> 400 µg/m <sup>3</sup> <small>[mitjana horària durant 3 hores en una àrea representativa de 100km o aglomeració sencera (ciutat)]</small>	
PM <sub>10</sub>	<u>diari (24h):</u> <b>50 µg/m<sup>3</sup></b> [OMS: 50 µg/m <sup>3</sup> ] <small>[No superar més de 35 vegades l'any el valor límit de 50 µg/m<sup>3</sup> o que el percentil 90,4 sigui igual o inferior al valor límit<sup>[1]</sup> de 50 µg/m<sup>3</sup>]</small>	<u>Mitjana anual:</u> <b>40 µg/m<sup>3</sup></b> [OMS: 20 µg/m <sup>3</sup> ]
PM <sub>2,5</sub>		<u>Mitjana anual:</u> <b>25 µg/m<sup>3</sup></b> [OMS: 15 µg/m <sup>3</sup> ]
O <sub>3</sub>	<u>Valor màxim diari de les mitjanes 8-horàries:</u> <b>120 µg/m<sup>3</sup></b> [OMS: 100 µg/m <sup>3</sup> ] <small>[Límit superació permès: 25 vegades l'any en una mitjana de 3 anys]</small>	
	<u>Llindar d'especial alerta:</u> 240 µg/m <sup>3</sup> <small>[mitjana diària]</small>	

Font: [18], [19] i [20]

Tot i que la normativa de la Unió Europea segueix sent menys estricta que la d'altres nacions desenvolupades, el seu compliment segueix sent problemàtic a moltes regions de la UE.

### Seguiment de la normativa europea a Barcelona (NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> i O<sub>3</sub>)

Pel que fa a Barcelona, la qualitat del seu aire ha millorat lleugerament els últims anys. Per mesurar els nivells de contaminació de la ciutat, la Generalitat de Catalunya disposa de la **Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica (XVPCA)**, formada per diverses estacions de mesura classificades en [10]:

- **Urbanes de trànsit.** Estan ubicades en zones on les mesures que prenen es veuen fortament influenciades per la circulació dels vehicles.
- **Urbanes de fons.** Mesuren la contaminació que prové de l'exterior de l'àmbit urbà.

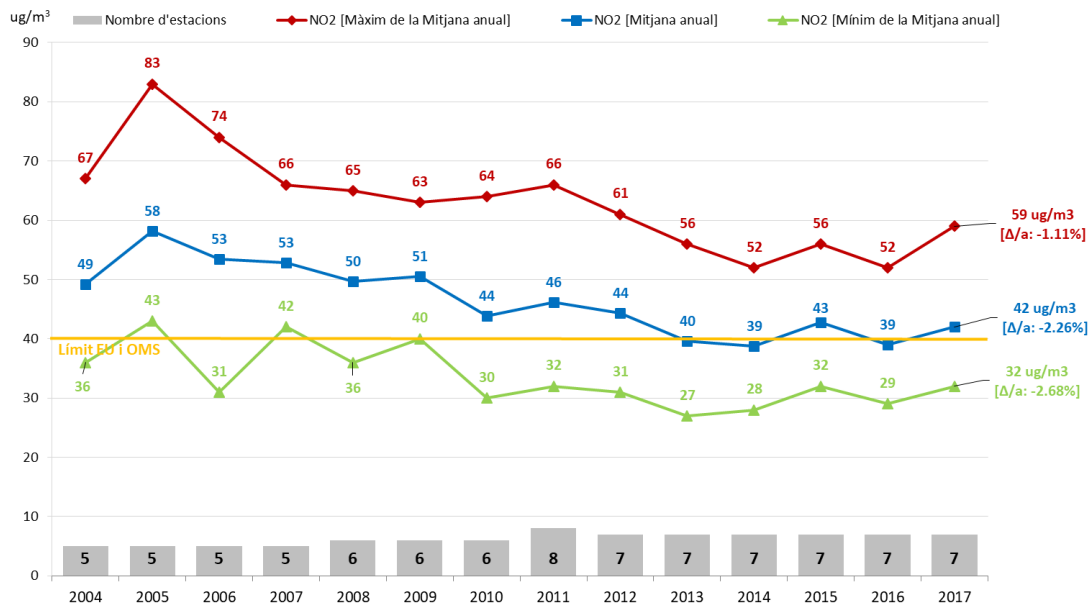
A Barcelona (2017) hi havia un total de 7 estacions que mesuren NO<sub>2</sub>, 11 que mesuren PM<sub>10</sub>, 6 que mesuren PM<sub>2,5</sub> i 5 que mesuren O<sub>3</sub> [21]. A continuació es mostra informació relativa als nivells de contaminació de NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> i O<sub>3</sub> a Barcelona.

#### NO<sub>2</sub>

En relació a Barcelona, els valors d'immissió de NO<sub>2</sub> registrats a les diferents estacions de la XVPCA ubicades a la ciutat l'any 2017 constaten que els llindars europeus en mitjana anual (40 µg/m<sup>3</sup> anual) van ser superats a 3 estacions, concretament a les estacions de Poblenou, Gràcia – Sant Gervasi i Eixample. Pel que fa a la superació del valor límit horari (superar els 200 µg/m<sup>3</sup> horaris superat 18 vegades l'any), aquest va estar lluny de produir-se a les estacions de mesura. De fet, a l'any 2017 només es va superar 4 vegades a l'estació de Gràcia – Sant Gervasi.

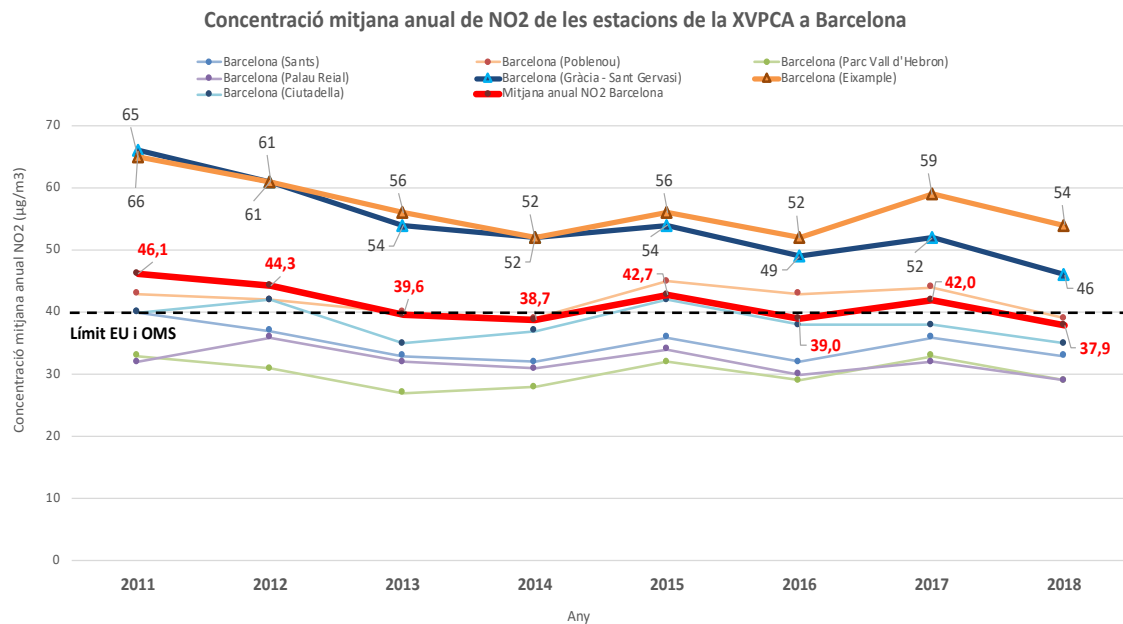
En referència a la mitjana de la immissió anual de les estacions de mesura de Barcelona, aquesta resulta ser de 42 µg/m<sup>3</sup>, superant així doncs els límits europeus i els valors recomanats per l'OMS (40 µg/m<sup>3</sup>) tot i que amb una tendència general a la baixa partint dels nivells mitjans del 2007.

Els nivells màxims i mínims de les concentracions mitjanes anuals de les estacions també van patir una davallada similar. El gràfic següent mostra els nivells (màxim, mínim i mitjana) fins al 2017.

Gràfic 3: Evolució de la immissió mitjana anual de NO<sub>2</sub> de les estacions de la XVPCA de Barcelona

Font: Barcelona Regional amb dades de la XVPCA

Per una banda, els nivells màxims de les mitjanes anuals representats al gràfic anterior (línia vermella) són els valors màxims assolits considerant les estacions existents cada any. Al següent gràfic es poden observar les dades específiques de les estacions que mesuren NO<sub>2</sub> a Barcelona.

Imatge 4. Evolució de la concentració mitjana anual de NO<sub>2</sub> de les estacions de la XVPCA a Barcelona

Font: Elaboració pròpia amb dades de la XVPCA.



Com es pot observar a l'anterior gràfic, tot i que la mitjana de la ciutat (en vermell) mostra una lleugera tendència a la baixa, les estacions de Gràcia-Sant Gervasi i Eixample s'han situat (els últims anys analitzats) per sobre dels límits establerts per la Unió Europea i recomanats per l'OMS en matèria de  $\text{NO}_2$  ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). De fet, any rere any es troben per sobre de la mitjana de la ciutat. Aquest fet posa en evidència que la població que viu a les zones on es troben ubicades aquestes estacions (prop de l'Eixample) pateixen especialment l'impacte a la qualitat de l'aire degut a la gran circulació de vehicles de motor. El següent gràfic indica en percentatge la quantitat d'estacions de Barcelona que superen els límits de la UE en matèria de  $\text{NO}_2$ .

Gràfic 4: Percentatge d'estacions de la XVPCA de Barcelona que superen l'indici a la ciutat ( $\text{NO}_2$ )



Font: Barcelona Regional amb dades de la XVPCA

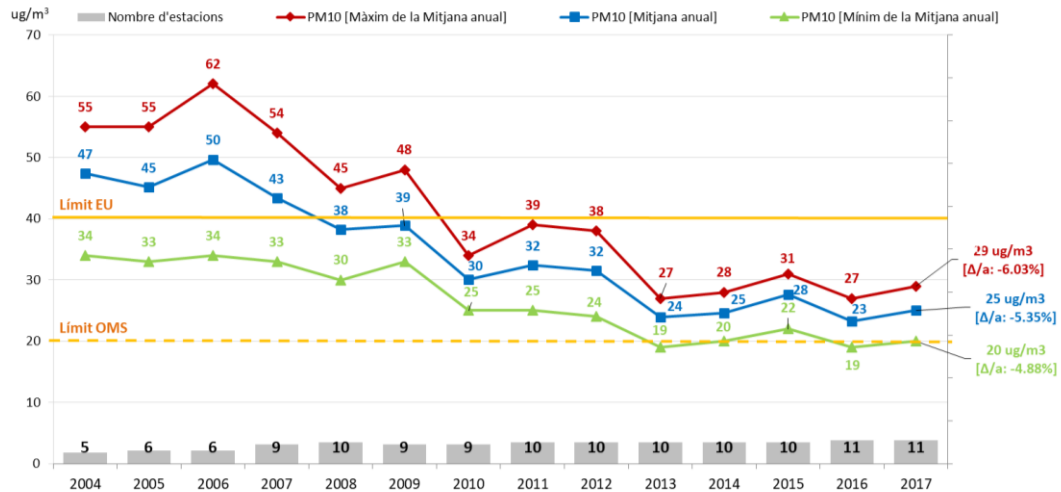
En definitiva, fent un còmput general a Barcelona el 2017, el 43% de les estacions de la XVPCA van superar els nivells màxims admesos per la legislació, tal i com es pot observar al gràfic anterior.

### PM<sub>10</sub>

Cal dir que a Barcelona hi ha una aportació important de partícules que procedeixen de l'exterior, tant en mitjana anual (aportació estructural pel règim de vents) com en determinats episodis diaris d'aportació de pols Sahariana (aportació esporàdica).

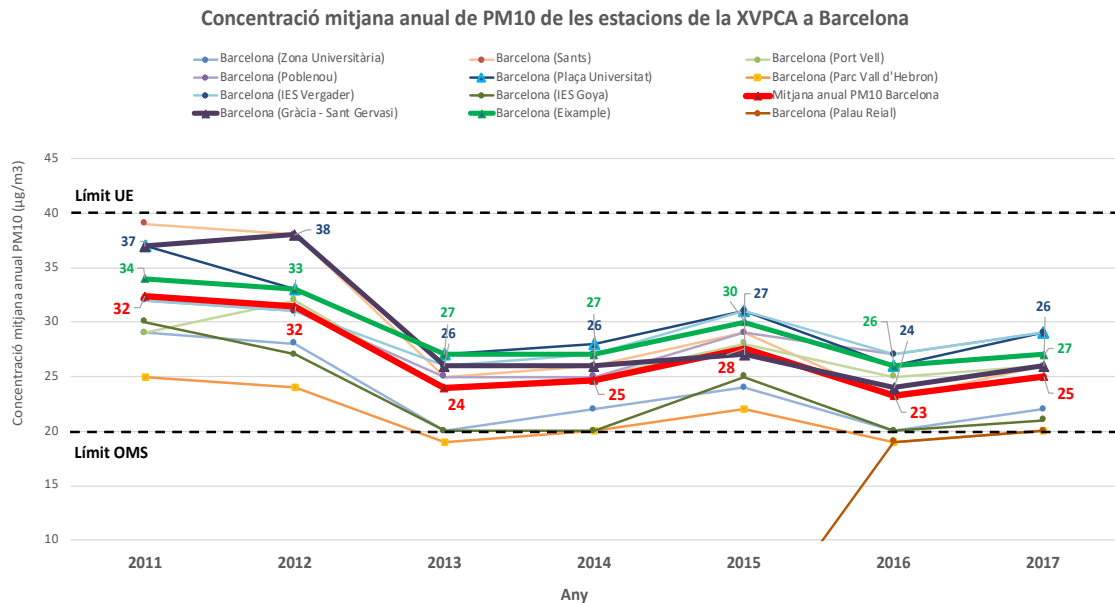
Considerant les 11 estacions de mesura de PM<sub>10</sub> a Barcelona, al 2017 la concentració mitjana anual d'aquestes va ser de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Els límits europeus es van complir a partir de l'any 2008 (amb  $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$  anuals) tot i que no s'hagin complert mai els valors recomanats per l'OMS ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de mitjana anual).

Cal dir també que els nivells màxims (línia vermella) han baixat amb una taxa de reducció més gran que els nivells mínims.

Gràfic 5: Evolució de la immissió mitjana anual de PM<sub>10</sub> de les estacions de la XVPCA de Barcelona

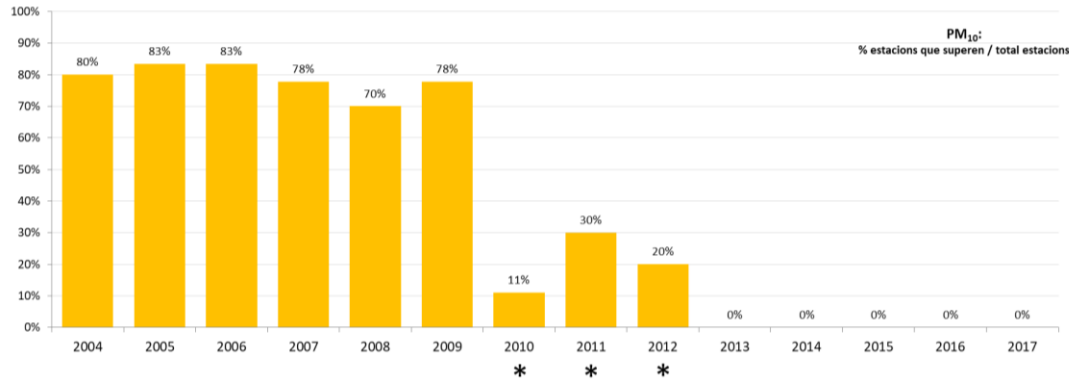
Font: Barcelona Regional amb dades de la XVPCA

És important tenir present que des de 2008 les mitjanes anuals s'han mantingut per sota els límits anuals europeus. Al següent gràfic es poden observar les dades específiques per estació.

Imatge 5. Evolució de la concentració mitjana anual de PM<sub>10</sub> de les estacions de la XVPCA a Barcelona

Font: Elaboració pròpia amb dades de la XVPCA. Nota: l'estació de Palau Reial entra en funcionament a partir de l'any 2016.

Si s'analitzen les dades referents a les partícules en suspensió, l'estació d'Eixample (verd) i Gràcia-Sant Gervasi (gris fosc) es troben pràcticament sempre per sobre de la mitjana de la ciutat (vermell), que ha anat disminuint al llarg dels últims anys. Tal i com passa amb el NO<sub>2</sub>, el principal culpable d'aquest registre és el trànsit rodador.

Gràfic 6: Percentatge d'estacions de la XVPCA de Barcelona que superen líndars a la ciutat (PM<sub>10</sub>)

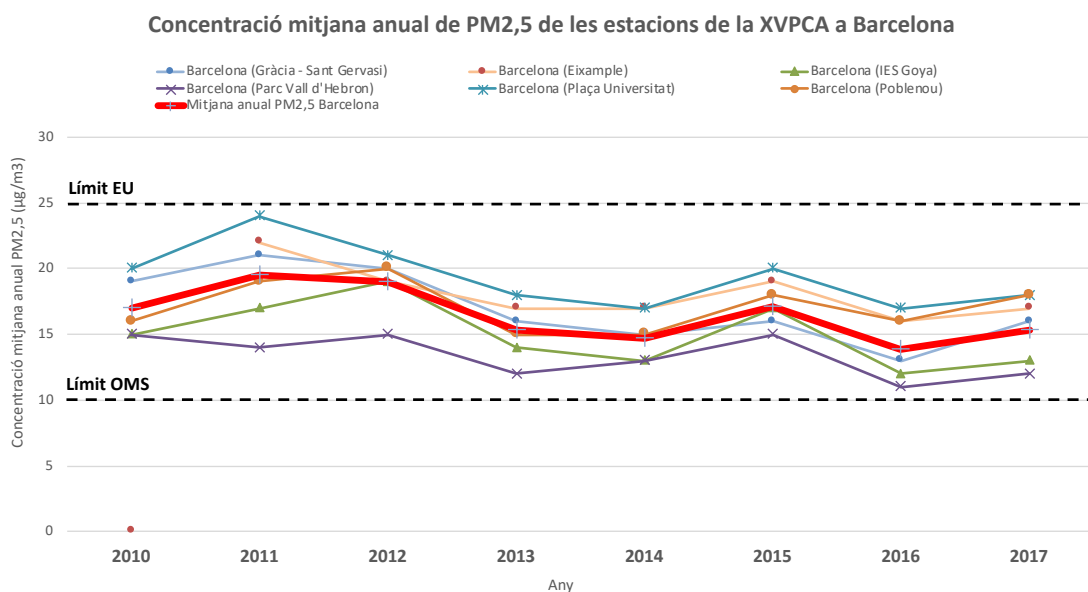
Font: Barcelona Regional amb dades de la XVPCA. (\*) indica que les superacions són per mitjana diària o Percentil 90,4

Com es pot observar al gràfic anterior, el percentatge d'estacions que superen els límits en PM<sub>10</sub> ha baixat dràsticament entre el 2006 i el 2010 (especialment aquest últim any). Aquesta disminució en les estacions que superen límits també pot ser deguda a la crisi econòmica iniciada el 2008, on es va reduir l'activitat productiva i conseqüentment les emissions contaminants.

A escala més local, l'aplicació de mesures per incentivar la mobilitat amb transport públic i bicicletes, així com desincentivar l'ús del vehicle privat poden haver contribuït a una reducció de les emissions per part del sector viari.

## PM<sub>2,5</sub>

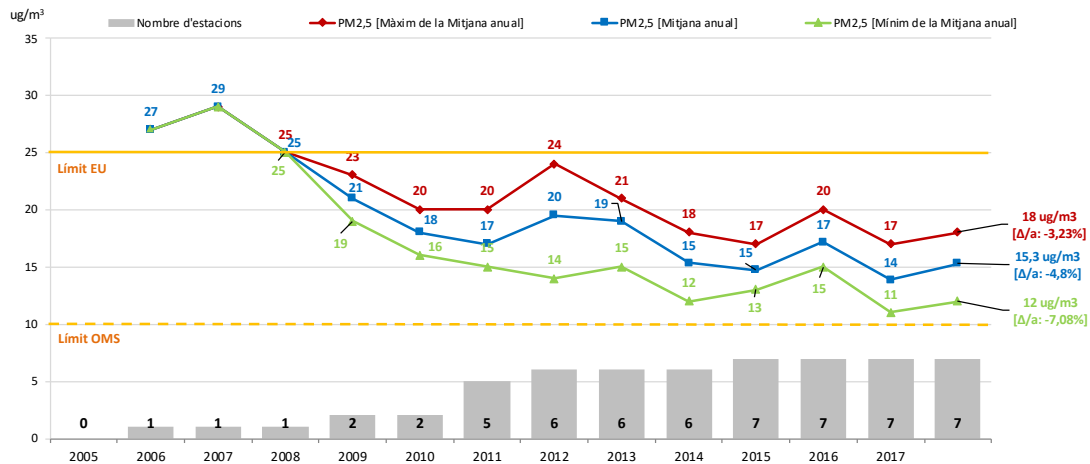
La reglamentació estableix només una mesura per limitar aquestes partícules: el límit anual. En relació a la UE, aquest és de 25 µg/m<sup>3</sup>, mentre que l'OMS recomana un màxim de 10 µg/m<sup>3</sup>. Al 2017, sis estacions mesuraven les PM<sub>2,5</sub> a Barcelona. A continuació es mostren els seus registres anuals (2010-2017).

Gràfic 7: Evolució de la immissió mitjana anual de PM<sub>2,5</sub> de les estacions de la XVPCA de Barcelona (2010-2017)

Font: Elaboració pròpia amb dades de la XVPCA

Els valors mesurats per les estacions sempre es troben per sobre de les recomanacions anuals de l'OMS i per sota dels de la UE. Tot i així, s'observa una lleugera tendència a la baixa de la mitjana anual a la ciutat. De fet, la mitjana anual més alta es registra a l'estació de Plaça Universitat (estació urbana de trànsit), mentre que la mínima es registra al Parc de la Vall d'Hebron (estació urbana de fons).

Gràfic 8: Evolució de la immissió mitjana anual de PM<sub>2,5</sub> de les estacions de la XVPCA de Barcelona  
Evolució de la immissió anual de PM<sub>2,5</sub> del promig les estacions de la XVPCA de Barcelona

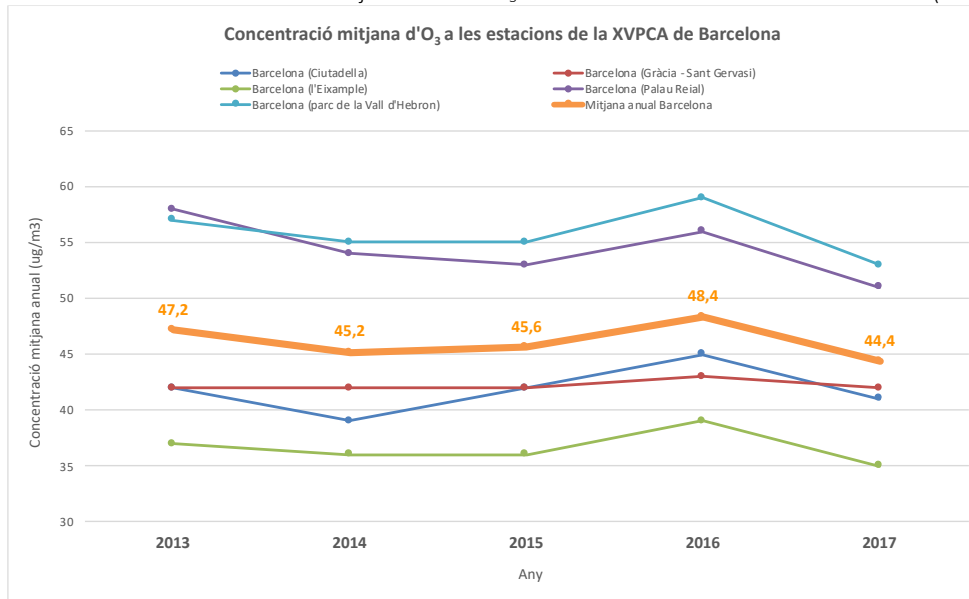


Font: Barcelona Regional amb dades de la XVPCA

Com en el cas de les PM<sub>10</sub>, la mitjana anual de PM<sub>2,5</sub> de les estacions de Barcelona supera el nivell recomanat per l'OMS (10 µg/m³). L'evolució tant de la màxima, mitjana i mínima han anat a la baixa al llarg dels anys mentre les estacions de mesura han incrementat (aquest fet pot haver influït també).

### O<sub>3</sub>

La reglamentació estableix només una mesura per limitar aquestes partícules: el límit anual. En relació a la UE, aquest és de 25 µg/m³, mentre que la recomanació de l'OMS es xifra en 10 µg/m³. Al 2017, cinc estacions mesuraven les PM<sub>2,5</sub> a Barcelona. A continuació es mostren els seus registres anuals (2010-2017).

Gràfic 9: Evolució de la immissió mitjana anual de O<sub>3</sub> de les estacions de la XVPCA de Barcelona (2013-2017)

Font: Elaboració pròpia amb dades de la XVPCA

A l'anterior imatge es pot observar com la concentració mitjana sembla que va a la baixa tot i patir un repunt l'any 2016.

Pel que fa a superacions, el màxim diari de les mitjanes 8-horàries va superar 4 vegades el valor de 120 µg/m<sup>3</sup> a l'estació de Vall d'Hebron (la normativa diu que no es pot superar en cap ocasió). De fet, aquesta estació és la que registra valors mitjans anuals més alts d'ozó de la ciutat. Es tracta d'una estació de fons urbà. Tal i com s'ha esmentat abans, l'ozó té tendència a dipositar-se a les zones allunyades dels seus precursors (principalment de les emissions del trànsit). Per altra banda, els nivells més baixos es presenten a l'estació de l'Eixample: una estació urbana de trànsit exposada a un nivell de circulació de vehicles molt elevat.

D'aquesta manera s'observa que les estacions urbanes de trànsit registren alts valors de NO<sub>2</sub> i partícules, mentre que les urbanes de fons capten alts valors d'ozó. Les emissions del trànsit, doncs, tenen un efecte important a la qualitat de l'aire.

És per això que la Unió Europea pretén reduir les emissions de les tecnologies de propulsió convencionals (gasolina i dièsel) per mitjà de regulacions. També vol seguir apostant decididament pel vehicle elèctric com a eina de mobilitat sostenible.

### Vehicles de combustió més nets

Tal i com s'ha mencionat a la problemàtica que ha motivat aquest projecte, les emissions del trànsit rodat a la Unió Europea representen gairebé un 39% de NO<sub>x</sub>, un 10% de PM<sub>10</sub> i un 11% de PM<sub>2,5</sub> del les emissions globals de la UE [15]. La majoria d'aquestes emissions ocorren arran de terra (carreteres), sovint on la gent hi viu i hi treballa. Conscient d'aquestes xifres i amb el potencial de reducció d'emissions que representa l'evolució tecnològica, la Unió Europea va establir una normativa de límit d'emissions en els vehicles de combustió a partir de l'any 1992. Es coneix com a normativa EURO i s'aplica a tots els

vehicles circulants de la Unió Europea. És important destacar que les motocicletes i ciclomotors van desfasades en el temps amb els altres vehicles en relació a les normatives EURO. Així doncs, un turisme EURO 4 no està emmarcat en el mateix període de temps que una motocicleta EURO 4, per exemple.

La nomenclatura EURO amb nombres romans (I, II, III...) és designada per als vehicles pesants (camions, autobusos i autocars).

A continuació es descriuen breument cadascuna de les normatives EURO [22]:

- **Pre-Euro.** Abans de la normativa EURO, els vehicles no estaven sotmesos a cap restricció pel que fa a emissions.
- **Euro 1/I.** Entra en vigor per a turismes, furgonetes i camions el juliol de l'any 1992. Per a les motocicletes i ciclomotors entra en vigor al juny del 1999. Es caracteritzava per l'aparició de catalitzadors opcionals (aleshores molt cars) a les línies d'escapament per neutralitzar part dels contaminants emesos pel motor. Aleshores, l'alimentació del motor es duia a terme majoritàriament amb carburadors.
- **Euro 2/II.** Entra en vigor per a turismes, furgonetes i camions el gener de 1996. Per a les motocicletes i ciclomotors entra en vigor l'abril del 2004. Els vehicles comencen a equipar equips d'injecció als seus motors i la carburació queda obsoleta progressivament.
- **Euro 3/III.** Entra en vigor per a turismes, furgonetes i camions el gener del 2000. Per a les motocicletes i ciclomotors entra en vigor el gener del 2006. Apareix la tecnologia de recirculació de gasos d'escapament (*EGR*).
- **Euro 4/IV.** Entra en vigor per a turismes, furgonetes i camions el gener del 2005. Per a les motocicletes i ciclomotors entra en vigor el gener del 2016; és la normativa en vigor a l'any de redacció d'aquest treball d'aquest treball (motos i ciclomotors).
- **Euro 5/V.** Entra en vigor per a turismes, furgonetes i camions el setembre del 2009. Aquesta normativa especifica per les motos entrarà en vigor l'any 2020. Els vehicles dièsel equipen per primera vegada i de forma obligatòria (fins aleshores era opcional) un filtre anti-partícules (*FAP*), fet que fa reduir significativament les PM's emeses pel tub d'escapament dels vehicles propulsats amb gasoil.
- **Euro 6/VI.** Entra en vigor per a turismes, furgonetes i camions el setembre del 2014. No hi ha projectada una EURO 6 aplicada als vehicles de dues rodes encara. Aquesta normativa es caracteritza per l'equipament per part dels vehicles dièsel d'un catalitzador de reducció selectiva (*SCR*) amb additiu *AdBlue* (dissolució d'urea), utilitzat per reduir dràsticament l'emissió de NO<sub>x</sub> i part de les PM's.

Per tant, la normativa actual d'emissions (2019) és la EURO 6/VI per als tots els vehicles menys les motos, que es troben en la fase d'EURO 4.

Els factors d'emissió homologats per les últimes versions EURO han evolucionat cap a valors força més baixos que els seus homòlegs anteriors. Com a exemple, l'evolució dels factors d'emissió per els turismes es mostra a la següent taula.

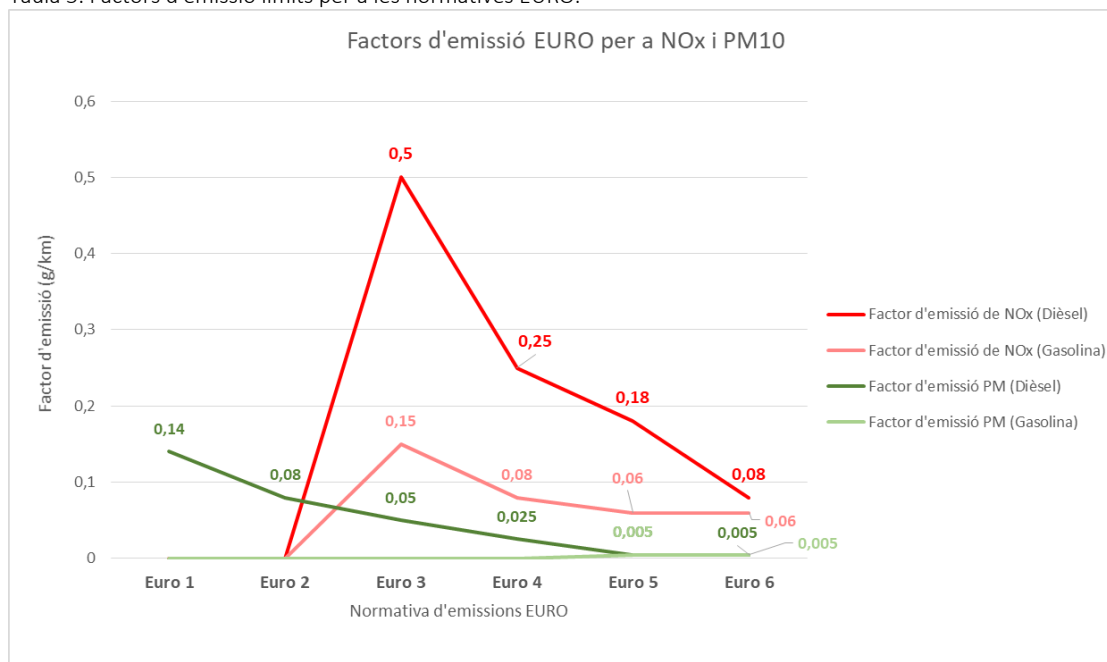
Taula 4. Factors d'emissió límit de les successives normatives EURO (g/km). Turismes.

Dièsel	Data d'entrada en vigor	CO	NO <sub>x</sub>	HC+NO <sub>x</sub>	PM
Euro 1	Juliol 1992	2,72	No hi ha límit	0,97	0,14
Euro 2	Gener 1996	1	No hi ha límit	0,7	0,08
Euro 3	Gener 2000	0,64	0,5	0,56	0,05
Euro 4	Gener 2005	0,5	0,25	0,3	0,025
Euro 5	Setembre 2009	0,5	0,18	0,23	0,005
Euro 6	Setembre 2014	0,5	0,08	0,17	0,005
Gasolina	Data d'entrada en vigor	CO	NO <sub>x</sub>	HC+NO <sub>x</sub>	PM
Euro 1	Juliol 1992	2,72	No hi ha límit	0,97	No hi ha límit
Euro 2	Gener 1996	2,2	No hi ha límit	0,5	No hi ha límit
Euro 3	Gener 2000	2,3	0,15	No hi ha límit	No hi ha límit
Euro 4	Gener 2005	1	0,08	No hi ha límit	No hi ha límit
Euro 5	Setembre 2009	1	0,06	No hi ha límit	0,005
Euro 6	Setembre 2014	1	0,06	No hi ha límit	0,005

Font: COPERT, amb dades de [23]

El següent gràfic mostra els valors límits de la taula anterior per a NO<sub>x</sub> i PM<sub>10</sub>.

Taula 5. Factors d'emissió límits per a les normatives EURO.



Font: COPERT, amb dades de [23]

A l'anterior imatge es pot observar com les normatives EURO han portat cap a factors d'emissió més baixos tant en el cas de la gasolina com en el cas del dièsel (tot i que la davallada ha sigut més aguda en el cas del gasoil). Això es tradueix en menys emissions per quilòmetre recorregut.

A l'anterior imatge també es pot observar com un turisme EURO 6 gasolina emet un 84 % menys que un homòleg EURO 3, un 68 % menys que un homòleg EURO 4 i un 56 % menys que un homòleg EURO 5 (de mitjana per cada quilòmetre recorregut).

Tenint en compte que el parc circulant no s'electrificarà completament en els propers anys (el vehicle elèctric encara no té la capacitat d'acaparar totes les vendes de vehicles actualment degut a factors tecnològics, econòmics i socials) és raonable pensar que el parc circulant actual (amb la majoria de vehicles de combustió) es modernitzi i evolucioni cap a un parc menys contaminant, tot i seguir dominat per tecnologies de combustió. D'aquesta manera, si bé les emissions no s'eliminen, es redueixen en una proporció important.

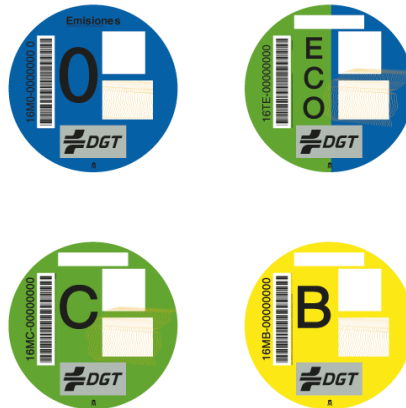
A nivell espanyol, s'ha utilitzat la normativa EURO establerta per dur a terme una categorització dels vehicles més contaminants. En aquest sentit, la Direcció General de Trànsit (DGT) va expedir una sèrie d'etiquetes durant els mesos d'octubre i novembre del 2016 als vehicles del parc censat espanyol en el marc del **Pla Nacional de la Qualitat de l'Aire i protecció de l'atmosfera (2013-2016)**. La DGT els classifica en funció del seu potencial emissiu i permet discriminar positivament els vehicles més respectuosos amb el medi ambient. Aquesta categorització és important per Barcelona perquè implementarà una **Zona de Baixes Emissions (ZBE)** de forma permanent a partir del gener del 2020. La classificació de les etiquetes és la següent en base a [24].

- **Zero emissions (distintiu blau):** Propi d'aquells vehicles elèctrics de bateria (BEV), vehicle elèctric d'autonomia estesa (REEV), vehicle elèctric híbrid endollable (PHEV) amb una autonomia mínima de 40 quilòmetres o vehicles de pila de combustible (FCEV).
- **ECO (distintiu verd i blau):** Propi d'aquells vehicles híbrids endollables amb autonomia inferior als 40km, vehicles híbrids no endollables (HEV), vehicles propulsats per gas natural (GNC i GNL) o gas liquat del petroli (GLP).
- **C (distintiu verd):** Turismes i furgonetes de gasolina matriculades a partir de gener de 2006 i dièsel a partir de 2014. Vehicles de més de 8 places i de transport de mercaderies, tant de gasolina com de dièsel, matriculats a partir de 2014.
- **B (distintiu groc):** Turismes i furgonetes de gasolina matriculades a partir de gener de l'any 2000 i de dièsel a partir de gener de 2006. Vehicles de més de 8 places i de transport de mercaderies, ja siguin de gasolina o de dièsel, matriculats a partir del 2005.
- **Sense etiqueta:** vehicle contaminant que no compleix cap dels requisits ambientals anteriors.

L'aspecte dels diferents distintius tot just esmentats es presenten a la següent imatge.



Imatge 6. Etiquetes ambientals de la DGT.



Font: [24]

### Aposta pel vehicle elèctric

Les projeccions futures del vehicle elèctric suposen un repte de gestió energètica important, ja que aquest desplaçarà molt volum d'energia dels combustibles a l'electricitat, fent caure la demanda de petroli considerablement. Segons [25], l'any 2040 els vehicles elèctrics necessitaran 1.400 TWh a nivell mundial, equivalent a aproximadament el 10% del consum elèctric mundial de l'any 2017. Pel que fa a Europa, el consum elèctric d'aquests vehicles cap a l'any 2050 equivaldrà al 9,5% del total de la demanda elèctrica [26].

**Dades bàsiques del mix energètic espanyol (2017):** El 46,3% de la potència instal·lada a Espanya és d'energia renovable (uns 48.208 MW) i gairebé el 33,7% de la generació elèctrica nacional (83.718 GWh) és d'origen renovable [27].

Tot i no tenir emissions relacionades amb el motor, els vehicles elèctrics emeten igualment PM's provinents del desgast de les rodes i els frens. Això cal tenir-ho en compte.

El vehicle elèctric comença a ser cada cop més competitiu. Tot i així, s'enfronta encara a un conjunt de barreres tècniques i socials difícils de superar.

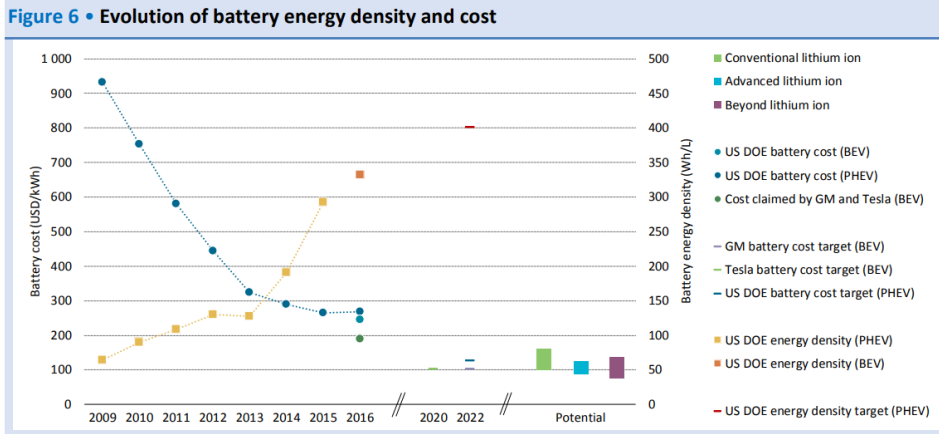
A nivell tècnic, les **bateries** encara són un obstacle per poder competir plenament amb un ICEV (vehicle de combustió). De fet, aproximadament un terç del cost d'un vehicle elèctric prové de la bateria [25]. Els factors que afecten al cost de les bateries són bàsicament:

- **Química utilitzada per produir-la.** Les bateries de Liti són les més utilitzades en els vehicles elèctrics de l'actualitat.
- **Capacitat de producció.** No totes les fàbriques assoleixen una economia d'escala plena en la producció de bateries.
- **Capacitat i densitat de la bateria.** Tot i que s'estan fent grans avenços en relació als costos per kWh (Imatge 7), encara no s'ha aconseguit una paritat completa amb els vehicles convencionals de combustió.

- **Velocitat de recàrrega.** Les velocitats de càrrega actuals permeten al voltant del 80% de recàrrega en uns 40-60 minuts en un carregador ràpid. Incrementar la velocitat de recàrrega implica major complexitat de la bateria i un desgast prematur d'aquesta.

La següent imatge mostra la reducció dels costos per kWh de les bateries al llarg del temps (2009-2016).

Imatge 7. Reducció dels costos per kWh de les bateries al llarg del temps (2009-2016).



Font: [26].

### Descripció de les tecnologies de mobilitat elèctrica actuals

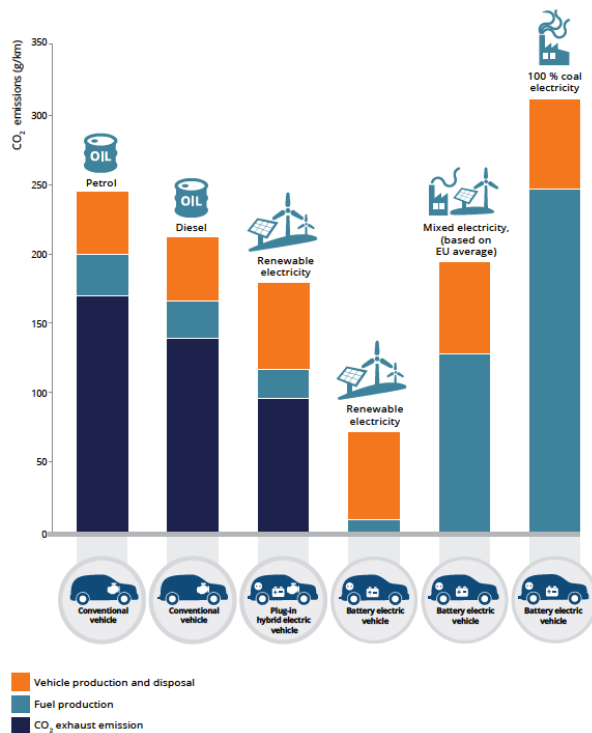
Actualment, hi ha diverses tecnologies que incorporen l'electricitat en la propulsió dels vehicles en menor o major mesura. Es presenten a continuació, una a una [28].

#### Vehicle elèctric de bateria (BEV)

El vehicle elèctric de bateria (Battery Electric Vehicle) es propulsa únicament per un motor elèctric alimentat per una bateria equipada a bord del vehicle. Sense tenir en compte la procedència de l'electricitat emmagatzemada a la bateria, l'eficiència energètica de tot el sistema motriu pot arribar a valors de fins al 80%. La gran majoria de BEV's disposen de la tecnologia de frenada regenerativa, consistent en utilitzar l'energia de les frenades per carregar la bateria.

Els majors beneficis ambientals de l'ús d'aquest tipus de vehicle venen quan les bateries s'alimenten d'energia elèctrica d'origen renovable [29]. Sinó, inclús pot arribar a tenir més impacte ambiental que un vehicle de combustió interna convencional (ICEV) tal i com es mostra a la següent imatge.

Imatge 8. Emissions equivalents (g CO<sub>2</sub>/km) durant el cicle de vida d'un vehicle mitjà segons procedència de l'energia elèctrica.



Font: [29]. NOTA: la distància total recorreguda del vehicle és de 220.000 km.

Així doncs, un BEV propulsat amb energia 100% provinent d'una planta de generació de carbó representaria més emissions de gasos d'efecte hivernacle que un vehicles de combustió. Per tant, cal apostar perquè l'energia que propulsa un BEV sigui d'origen renovable, comportant així el menor impacte ambiental.

Un dels avantatges evidents que presenta aquest vehicle és el seu baix nivell de soroll, reduint així la contaminació acústica a les ciutats.

Un dels inconvenients que encara presenta el BEV i encara element de persuasió de compra per part dels usuaris és l'autonomia d'aquests vehicles. Actualment, en el millor dels casos, alguns vehicles poden recórrer fins a 400 km sense haver de recarregar la bateria, tot i que l'autonomia mitjana pot anar des de els 80-400 km [16]. Un altre factor que no convenç a la majoria d'usuaris és l'estructura de recàrrega concebuda com insuficient; també el temps invertit en carregar la bateria, encara molt lluny del temps d'espera per omplir el dipòsit de combustible d'un ICEV.

Imatge 9. Nissan Leaf, un dels BEV més venuts a Espanya l'any 2018.



Font: nissan.es

### Vehicle elèctric híbrid (HEV)

El vehicle elèctric híbrid porta ja al voltant d'uns 15 anys al mercat, millorant la seva eficiència generació rere generació.

Aquests vehicles combinen un motor de combustió interna (motor principal) i un motor elèctric (motor auxiliar) que ajuda al motor principal durant l'arrencada i les acceleracions. A diferència dels BEV's, els HEV's no poden carregar la bateria a través de la xarxa; aquesta només es carrega gràcies al motor de combustió en moments de baixa càrrega. L'objectiu d'aquest vehicle no és la electrificació en sí, sinó la millora en la eficiència en el consum de combustible, reduint a la vegada les emissions de gasos contaminants respecte un ICEV. Són vehicles que presenten major complexitat que els ICEV ja que disposen de dos sistemes de propulsió diferents. Generalment, les bateries equipades pels HEV's permeten realitzar fins a 10 km de forma exclusivament elèctrica [16].

### Vehicle elèctric híbrid endollable (PHEV)

En els vehicles elèctrics híbrids endollables també hi conviuen un motor elèctric i un de combustió interna com en el cas dels HEV's. Equipen bateries més grans que els vehicles híbrids però més petites que els BEV's; es poden carregar connectant-les a la xarxa. El motor elèctric té molt protagonisme, funcionant de forma exclusiva en trajectes curts i de baixa càrrega com els urbans (pot realitzar entre 20 i 85 km de mitjana). Per viatges interurbans més llargs, el vehicle es propulsa amb el motor de combustió.

El seu impacte ambiental depèn molt del seu mode d'operació. Així doncs, el mode elèctric representa emissions locals nul·les; mentre que en mode de combustió, els consums de combustible poden arribar a ser iguals o majors que els d'un ICEV (de característiques similars) degut al pes addicional que representen les bateries equipades. De manera anàloga al BEV, l'impacte d'aquesta tipologia de vehicle en el medi ambient també tindrà a veure amb la procedència de l'energia elèctrica de les bateries.

### Vehicle elèctric de major autonomia (REEV)

El vehicle elèctric amb autonomia ampliada és un vehicle que es propulsa únicament amb un motor elèctric tot i que també equipa un motor de combustió interna. Aquest motor auxiliar només s'utilitza per carregar les bateries en cas de que aquestes presentin un nivell de càrrega baix quan no és possible carregar-les amb connexió a la xarxa. Per tant, acostuma a ser un motor més aviat petit.

### Vehicle elèctric de pila de combustible (FCEV)

Els vehicles de pila de combustible es propulsen exclusivament amb un motor elèctric. Aquesta electricitat prové d'una pila de combustible, que transforma hidrogen (emmagatzemat en un dipòsit a alta pressió) i l'oxigen de l'aire en electricitat i aigua. Per tant, no produeix emissions contaminants a l'aire.

Els principals problemes dels vehicles de pila de combustible són la disponibilitat comercial i obtenció d'hidrogen, al no ser un gas trobat directament a la Terra.

Actualment, la gran majora d'hidrogen produït al planeta és per mitjà de processos de reformat d'hidrocarburs. Per tant, perpetua la dependència amb els combustibles fòssils. És important destacar que també existeixen tecnologies per produir hidrogen que no depenen dels combustibles fòssils. És el cas de la hidròlisi. Aquest procés reuneix electricitat i aigua per aconseguir hidrogen. L'electricitat pot provenir d'energies renovables com la solar fotovoltaica o la eòlica. Ara bé, la hidròlisi encara és una opció força més cara que el SMR (Reformat d'hidrocarburs) a l'hora de produir hidrogen.

### *Mesures de suport de la UE al vehicle elèctric*

En relació al paper que juga el vehicle elèctric al sector viari, la Unió Europea ha anat adoptant una sèrie de mesures per seguir estimulant i consolidant la seva presència al mercat europeu.

Les mesures que aplica sovint estan coordinades amb els Estats Membres de la Unió [16] i [30]:

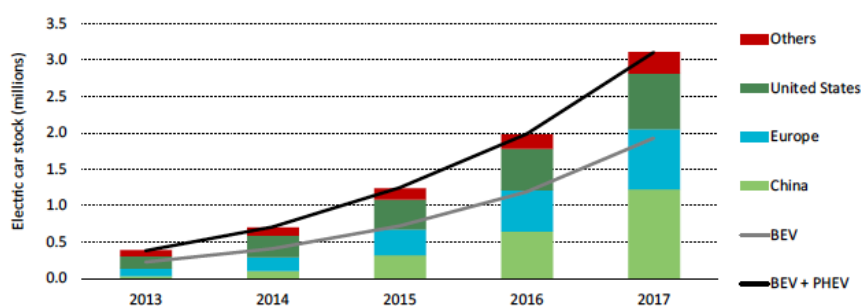
- **Incentiva i mobilitza** als Estats Membres per una reducció de taxes i/o pàrquing públic gratuït pels vehicles de baixes emissions.
- **Informa** a la població (a través de programes) dels avantatges que suposa tenir en propietat un vehicle elèctric (la possibilitat de carregar els vehicles elèctrics en punt de recàrrega públic, el baix cost de manteniment...).
- **Inverteix** 200 M€ en investigació i recerca en l'àmbit de les bateries durant el període 2018-2020, per tal que es redueixi el seu cost.
- **Invertirà** uns 30.600 M€ durant el període 2021-2027 en l'àmbit de les infraestructures per un transport sostenible. Això afecta en part a les infraestructures de recàrrega de vehicles elèctrics dels Estats Membres de la Unió Europea.

### *Situació actual del vehicle elèctric*

Totes les tecnologies de mobilitat elèctrica resumides anteriorment són opcions ja disponibles al mercat d'alguna manera o altra. A Espanya, el parc de vehicles elèctrics estava xifrat l'any 2017 en aproximadament 27.700 [31]. Poc més del 50% d'aquests són vehicles turismes purs (BEV). A les següent imatges es mostra l'evolució temporal del parc de vehicles elèctric de les diferents regions del món.

Imatge 10. Evolució temporal dels diferents mercats del vehicle elèctric.

**Figure ES 1 • Evolution of the global electric car stock, 2013-17**



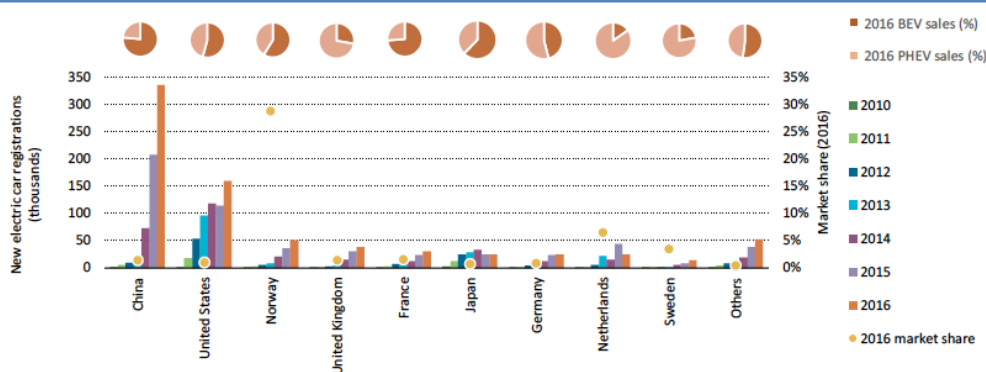
Font: [25].

Es pot observar que el parc mundial de vehicles elèctrics ha anat a l'alça al llarg dels últims anys. També es pot observar que el vehicle elèctric de bateria (BEV) és el segment que està creixent i consolidant amb més força, tot i que l'híbrid endollable (PHEV) el segueix de prop.

La Xina, Europa i els Estats Units són els principals mercats del vehicle elèctric i l'any 2017 es van sobrepassar els tres milions de vehicles elèctrics al món. A Espanya es van vendre poc més de 8.500 vehicles elèctrics (BEV+PHEV); van representar només un 0,6% de les vendes totals [31].

Imatge 11. Evolució temporal dels diferents mercats del vehicle elèctric (2010-2016).

**Figure 5 • Electric car sales, market share, and BEV and PHEV sales shares in selected countries, 2010-16**



Font: [26].

La següent taula mostra les vendes globals de vehicles i les vendes de vehicles elèctrics a Espanya l'any 2017.

Taula 6. Vendes globals de vehicles a Espanya al 2017 i proporció de vehicles alternatius.

Vendes Globals Espanya 2017 (vehicles)	1.462.235	% respecte el Global de vendes
vendes híbrids (vehicles)	55.769	3,8%
vendes BEV i PHEV (vehicles)	<b>8.645</b>	<b>0,6%</b>
Vendes alternatius (vehicles)	64.414	4,4%

Font: Elaboració pròpia en base a [31].

Noruega es postula com el país europeu amb més vendes de vehicle elèctric degut al recolzament que rep per part de l'administració. L'any 2017, més del 30% de tots els vehicles venuts a Noruega eren elèctrics, mentre que a Espanya només el 0,6% eren d'aquesta tipologia.

### Situació del vehicle elèctric a Barcelona

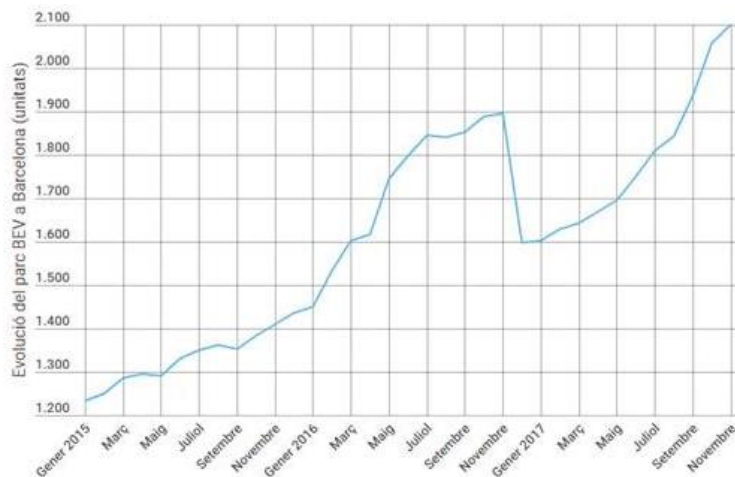
Segons la Plataforma LIVE (organisme que vetlla per la consolidació del VE a Barcelona) el parc de turismes elèctrics a la ciutat només un 0,14% del parc total (octubre 2017), tot i que les matriculacions mensuals van ser del 3,9% respecte les totals [32].

La penetració del vehicle elèctric no és tant important fora del municipi de Barcelona. A la província de Barcelona les matriculacions representaven un 1,45% del total, fet que resultava en un parc del 0,11% de turismes elèctrics [32].

Els ciclomotors i motocicletes, tot i disposar d'unes xifres inferiors als turismes, representen un 0,36% del parc i 6,68% de les matriculacions a Barcelona ciutat (octubre 2017). A la província de Barcelona, aquests representen un 0,44% del parc a causa d'un 6,57% de les matriculacions globals [32].

A la següent figura s'hi mostra l'evolució de les matriculacions de vehicles elèctrics a la ciutat de Barcelona fins a novembre del 2017.

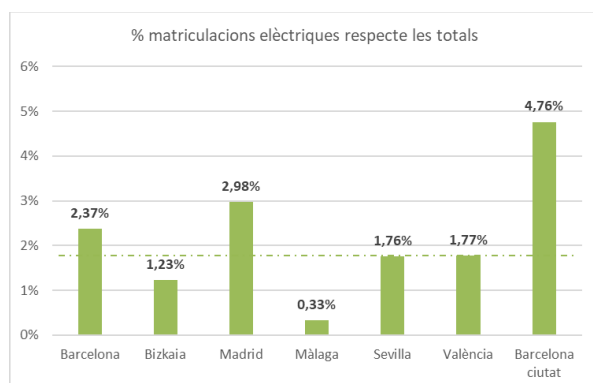
Imatge 12. Evolució temporal del parc de vehicles elèctrics a la ciutat de Barcelona.



Font: [32].

Tal i com es pot observar a l'anterior gràfic, en els últims tres anys s'han gairebé duplicat les matriculacions de vehicles elèctrics a la ciutat de Barcelona. Tot i així, es pot constatar una davallada a finals del 2016, causada per la baixa de moltes motocicletes pertanyents a un servei de moto elèctrica compartida. Barcelona va ser la gran ciutat de l'Estat amb més proporció de matriculacions elèctriques, tal i com es pot observar al següent gràfic.

Imatge 13. Matriculacions elèctriques respecte les totals de les províncies més importants a nivell econòmic de l'Estat Espanyol.



Font: [32].

Tornant als factors importants per la consolidació del vehicle elèctric, cal dir que la **infraestructura de recàrrega** també és un dels punts clau per a augmentar les seves vendes. Una estructura de recàrrega on els usuaris se sentin confiats en que podran



carregar el seu vehicle en algun moment del seu desplaçament sense patir en quedar-se sense bateria enmig de la carretera.

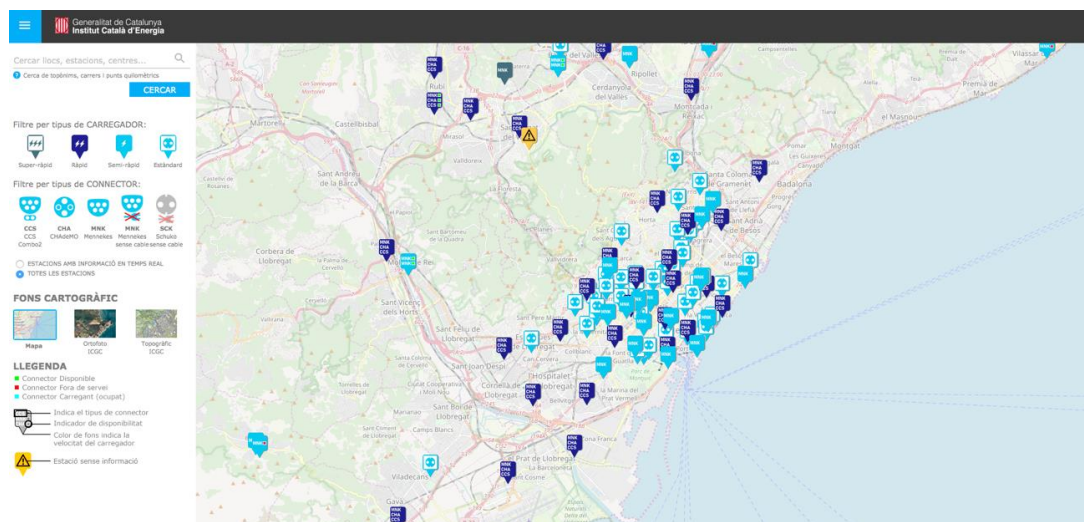
A desembre de 2017 i segons dades de l'ICAEN, hi havia 358 punts de recàrrega de vehicle elèctric a tot Catalunya (sense tenir en compte els punts de recàrrega d'instal·lacions privades). Això representa un total de 922 endolls a tota la regió. La ciutat de Barcelona disposava de pràcticament la meitat (49%) dels punts de recàrrega i dels endolls catalans totals (53%). Són 175 emplaçaments que representen 493 endolls [33].

Pel que fa al tipus de recàrrega de les estacions ubicades a Barcelona (no es tenen en compte els punts de recàrrega de les instal·lacions privades):

- **142** són exclusivament de **recàrrega Normal** (<11 kW). Representen un 81,1% dels punts de recàrrega de la ciutat (ICAEN).
- **10** són exclusivament de **recàrrega Semi-ràpida** (entre 11 kW i 22 kW). Representen un 5,7% dels punts de recàrrega de la ciutat (ICAEN).
- **17** són exclusivament de **recàrrega Ràpida** (de 22 kW fins a 120 kW en alguns casos) (9,7% dels punts de Barcelona). Representen un 9,7% dels punts de recàrrega de la ciutat (ICAEN).
- La resta de punts (3,5%) combinen recàrrega Normal i Semi-ràpida (ICAEN).

La següent taula mostra el mapa d'estacions de recàrrega de Catalunya, centrat a la zona de Barcelona

Imatge 14. Mapa interactiu amb les estacions de recàrrega de vehicle elèctric a Catalunya. Centrat en la zona de Barcelona.



Font: [icaen.cat](http://icaen.cat)

De fet, per seguir avançant cap a una mobilitat més eficient i més neta, la Generalitat de Catalunya va impulsar el Pla Estratègic per al Desplegament de la Infraestructura de Recàrrega per als Vehicles Elèctrics 2016-2019 (PIRVEC), que treballa en el desplegament de més punts de recàrrega a Catalunya, basant-se en uns objectius marcats per al 2020. Pretén assolir, abans del 2020 [32]:

- 100 estacions de recàrrega ràpida d'accés públic (potència >45 kW)
- 400 estacions de recàrrega semi-ràpida d'accés públic (potència >7,5 kW)



- 25.000 punts de recàrrega associats a vehicles elèctrics privats (pàrquings, garatges...)
- Més de 300.000 endolls de recàrrega totals a Catalunya abans del 2020.

## Metodologia

Aquest capítol descriu l'eina de dispersió utilitzada per a la modelització i quin ha estat el flux de treball realitzat per assolir-la.

### Model de dispersió ADMS-Urban

#### Descripció

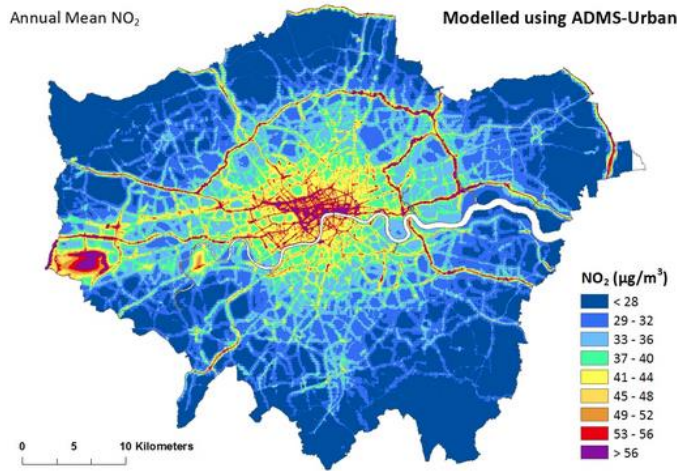
El model de dispersió utilitzat en aquest treball és l'ADMS-Urban, que ha estat desenvolupat per Cambridge Environmental Research Consultants (CERC, 2018). Es tracta d'un dels models de major prestigi a nivell mundial pel que fa a la modelització de la qualitat de l'aire a escala urbana. El seu funcionament està basat en el **Model Gaussià** de dispersió avançada.

Constitueix una eina utilitzada en investigació i gestió ambiental de territoris per a la millora de la qualitat de l'aire de ciutats i/o entorns metropolitans d'arreu del món. S'utilitza sobretot per analitzar escenaris de present i/o de futur basats en diferents hipòtesis que poden afectar a la contaminació d'una o altra manera. Els resultats obtinguts es poden comparar amb els estàndards o líndars de contaminació estipulats per les diferents institucions governamentals [34]. Això permet als governs prendre mesures per combatre la contaminació amb coneixement de causa ben fonamentat. Els antecedents d'aquest treball en relació a l'ús de l'ADMS-Urban es troben a continuació. El model s'ha utilitzat [35]:

- **Barcelona.** Utilitzat per realitzar models de qualitat de l'aire de la ciutat.
- **80 organismes de govern local del Regne Unit** per valorar i desenvolupar plans relatius a la qualitat de l'aire dels seus municipis.
- **La Xina.** L'ADMS-Urban es va utilitzar per modelitzar la qualitat de l'aire de Pequín durant els Jocs Olímpics de l'any 2008. També s'ha utilitzat a indrets com Shanghai i Hong Kong.
- **Singapur.** Ús relacionat amb estudis per l'Agència Nacional de Medi Ambient (NEA).
- **Califòrnia.** Utilitzat per l'avaluació de l'impacte de la contaminació a la salut de les persones.
- **França.** Utilitzat a Estrasburg per a la modelització i previsió de la qualitat de l'aire.
- **Itàlia.** Utilitzat a Roma i Bolonya per avaluar les emissions provinents del trànsit.
- **Londres.** Concretament per estudis de qualitat de l'aire pel Departament de Medi Ambient (Defra); modelització de propostes i escenaris a l'aeroport de Heathrow. També s'utilitza pel sistema de previsió de qualitat de l'aire "airTEXT".
- (...)

La següent imatge mostra un mapa d'immissió fruit d'un projecte realitzat a Londres amb ADMS Urban l'any 2008.

Imatge 15. Mapes d'immissió de mitjana anual de NO<sub>2</sub> a Londres (2008). Modelat amb ADMS-Urban.



Font: [35].

Les característiques més importants d'aquest model de dispersió són [34]:

- La capa límit participa en els càlculs de dispersió de contaminants. Es caracteritza per la seva altura, la seva longitud, un factor dependent de la fricció del fluid en funció de la seva velocitat i la calor intercanviada entre l'ambient i la superfície.
- Es poden modelitzar diversos tipus de fonts, cadascuna regida per uns càlculs específics. El model suporta mallats de fins a 3.000 elements, en els quals s'hi inclouen:
  - o Fins a 3.000 carreteres, modelitzades com a **fonts lineals**. Es caracteritzen amb la seva geometria (longitud i gruix de la carretera). A mode opcional, permet afinar el mallat al voltant de les carreteres amb l'objectiu d'obtenir resultats amb una major resolució (Intelligent Grid).
  - o Fins a 1.500 focus d'emissió puntuals, d'àrea o de volum poden ser modelitzats simultàniament. Les **fonts puntuals** s'utilitzen per quantificar l'efecte plomall de les grans indústries (xemeneies). Es caracteritzen com a cercles amb un diàmetre associats. Els camps de conreu o ramaderia es poden modelitzar com a **fonts d'àrea** ja que es poden considerar les emissions homogènies a tota la superfície. Es caracteritzen per mitjà dels vèrtexs que formen l'àrea i l'altura d'aquesta. Per últim, les sortides de túnels o les emissions derivades de l'ús de gas natural a les edificacions o les emissions dels vaixells es poden modelitzar com a **fonts de volum**, per exemple. Es caracteritzen per la definició del volum emissor i una velocitat d'emissió negligible.

Els receptors són aquells punts del domini pels quals es calculen els nivells de contaminació atmosfèrica. El model subdivideix els tram que uneixen cada font d'emissió amb els receptors en fins a 10 sub-trams, en funció de la distància que els uneix. Posteriorment, per mitjà de les equacions que es presenten a continuació, calcula l'efecte que té cada sub-tram en cadascun dels receptors.

En el cas de les fonts lineals, l'expressió que representa la concentració  $\bar{C}(x, y, z)$  provinent d'una font d'emissió de longitud  $L_s$  es mostra a l'Equació 1:

Equació 1. Concentració d'un contaminant provinent d'una font d'emissió lineal.

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{\bar{Q}_s}{2\sqrt{2\pi}\sigma_z(x)U} \exp\left(-\frac{(z-z_s)^2}{2\sigma_z^2}\right) \times \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{y+L_s/2}{\sqrt{2}\sigma_y}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-L_s/2}{\sqrt{2}\sigma_y}\right) \right]$$

Font: [34].

On:

- $\bar{Q}_s$  és el cabal d'emissió lineal de la font (unitats/m/s)
- $L_s$  és la longitud de la font d'emissió
- $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  són paràmetres que depenen de les condicions d'estabilitat atmosfèriques a cada punt
- $z_s$  és l'altura de la font d'emissió

En relació a les fonts d'àrea i volum, l'equació és molt similar. La diferència és que l'emissió a modelitzar es dona en una regió no lineal (ja sigui una àrea o un volum). L'expressió que representa la concentració  $\bar{C}(x, y, z)$  provinent d'una font d'emissió de longitud  $L_s$  i altura  $L_1$  es mostra a l'Equació 2:

Equació 2. Concentració d'un contaminant provinent d'una font d'emissió d'àrea o de volum.

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{\bar{Q}_s}{4U} \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{y+L_s/2}{\sqrt{2}\sigma_y}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-L_s/2}{\sqrt{2}\sigma_y}\right) \right] \times \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{z+L_1/2-z_s}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-L_1/2-z_s}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) \right]$$

Font: [34].

On:

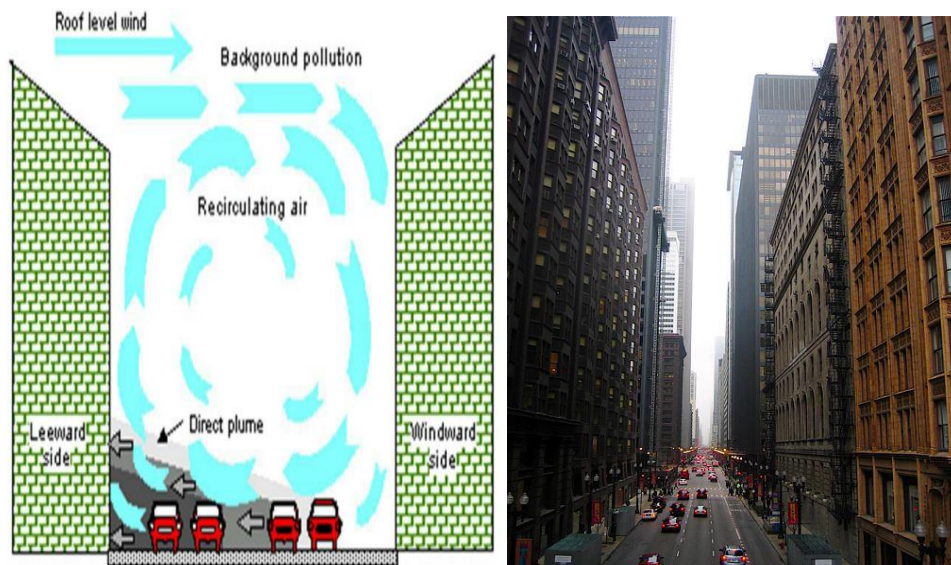
- $\bar{Q}_s$  és el cabal d'emissió superficial de la font (unitats/m<sup>2</sup>/s)
- $L_s$  és la longitud de la font d'emissió (m)
- $L_1$  és l'altura de la font d'emissió (m)
- $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  són paràmetres que depenen de les condicions d'estabilitat atmosfèriques a cada punt (m)
- $z_s$  és l'altura de la font d'emissió (m)

És important destacar que el model negligeix aquells trams de la font que tenen efecte pràcticament nul als receptors. D'aquesta manera s'agilitzen els càlculs.

Recuperant l'apartat de les característiques del model, aquest:

- Permet dotar a les emissions contaminants d'un caràcter temporal, incorporant **perfils** que descriuen el comportament diari, mensual i estacional de les emissions.
- Permet incorporar **contaminació de fons**: aquella contaminació que prové de l'exterior del domini de modelització i que no es modelitza explícitament.
- **Modelitza l'efecte "Street Canyon"** (bàsic o avançat) gràcies al mòdul **FLOWSTAR**. Aquest mòdul permet modelitzar la turbulència dels fluids i està basat en el model Danish OSPM (Operational Street Pollution Model).
  - o L'"Street Canyon" o també conegut com a canyó urbà, es produeix quan un carrer o carretera es troba envoltada d'edificis molt alts; l'efecte comença a ser especialment important quan l'altura dels edificis dobla l'amplada de la via [34]. Els contaminants es queden enclotats entre els edificis a causa de les turbulències creades per les complexes geometries urbanes. Per tant, la configuració dels carrers d'una gran ciutat com Barcelona té un paper important en la dispersió dels contaminants. L'esquema d'un *Street Canyon* o canyó urbà es mostra a la següent figura.

Imatge 16. Representació gràfica d'un canyó urbà (a la dreta un carrer de Chicago l'any 2006)

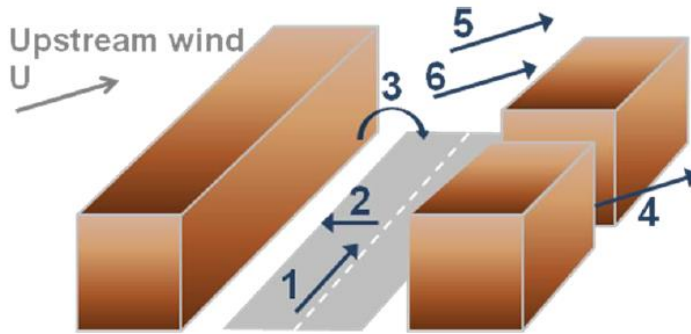


Font: ResearchGate i flickr.com

Un cop es caracteritza el canyó urbà (explicat a l'apartat de metodologia), el model calcula la complexa dispersió dins d'aquest a com a combinació de sis subgrups de dispersió i presentats a continuació.

La dispersió associada a cada fenomen és regida per equacions diferents [36].

Imatge 17. Els sis fenòmens de dispersió considerats pel mòdul Street Canyon avançat de l'ADMS-Urban



Font: [36].

### 1- Dispersió horitzontal al llarg del canyó

Càlcul dividit en dues fases: una inicial donada per l'Equació 3:

Equació 3. Dispersió horitzontal inicial al llarg del canyó.

$$C_i = \frac{Q_i}{2\sqrt{2\pi}U_x w \sigma_z} \left( \exp\left(-\frac{(z_{op} - z_s - H_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z_{op} + z_s + H_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right) (LateralProfile)$$

Font: [36].

I una posterior (quan el plomall es barreja bé a l'interior del canyó) donada per Equació 4:

Equació 4. Dispersió horitzontal un cop un cop el plomall s'ha barrejat a l'interior del canyó.

$$C_i = \frac{Q_i}{\sqrt{2\pi}U \sigma_y \sigma_z} \left( \exp\left(-\frac{(z_{op} - z_s - H_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z_{op} + z_s + H_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right)$$

Font: [36].

On, per a totes dues equacions:

- $Q_i$  és el cabal d'emissió (g/s)
- $U_x$  és la velocitat al llarg de l'eix longitudinal del canyó (m/s)
- $\sigma_y$  és l'amplada del plomall limitat per les dues bandes del canyó (m)
- $w$  és l'amplada de la font (en aquest cas la carretera, m)
- $z_{op}$  és l'altura del punt de sortida (m)
- $z_s$  és l'altura de la font (en aquest cas la carretera, m)
- $H_0$  és l'alçada inicial de barreja de contaminants (m)

## 2- Dispersió horitzontal perpendicular al canyó

El model distingeix entre canyons profunds i canyons amples, ja que aquests últims poden disposar de diverses zones de recirculació d'aire i això té efectes en la dispersió.  $H$  és l'altura del canyó i  $g$  es l'amplada del canyó. Per tant, es parla de canyons amples quan  $H/g < 1$  i de canyons profunds quan  $H/g > 1$  [36].

La concentració  $C$  a nivell de terra, a una distància  $y$  del centre de la carretera es regeix per l'Equació 5, formada a la vegada per l'Equació 6 i l'Equació 7:

Equació 5. Concentració a nivell de terra per a la dispersió horitzontal perpendicular al canyó .

$$C = C_0 \frac{(z_{op} - z_s + 2H_0)}{4H_0} + \frac{Q}{\sigma_w w} \frac{z_{op} - z_s - 2H_0}{4H_0} \ln \left( \frac{y - w_{incl}}{y + \frac{w}{2}} \right)$$

Font: [36].

On:

Equació 6. Amplada de la font modelitzada a cada tram del canyó urbà.

$$w_{incl} = \min \left( \frac{w}{2}, y, y - \Delta y_{zop} \right)$$

Font: [36].

Equació 7. Diferència d'altura del punt de sortida.

$$\Delta y_{zop} = \frac{(z_{op} - z_s - 2H_0)U_y(H_0)}{\sigma_w}$$

Font: [36].

## 3- Recirculació d'aire al pla perpendicular a la via

El model calcula la recirculació de l'aire present al pla perpendicular de la via per mitjà de models complexos de turbulència de fluids.

## 4- Dispersió als espais entre edificis del canyó

Calcula la dispersió entre els edificis com a dispersió perpendicular a l'eix longitudinal de la via. Per tant, utilitza els mecanismes de l'apartat 2 (Dispersió horitzontal perpendicular al canyó) regits per l'Equació 5, Equació 6 i Equació 7.

## 5- Dispersió a la zona per sobre del canyó

## 6- Dispersió al final del canyó

- El model també calcula específicament la dispersió de les emissions dels túnels.
- **Modelitza les reaccions químiques que es produeixen a l'aire** segons el mecanisme GRS [36] Aquest mòdul és especialment interessant per calcular les concentracions dels contaminants secundaris com l'ozó troposfèric ( $O_3$ ).

- Incorpora un model de pre-processament meteorològic basat en l'anàlisi de dades meteorològiques horàries (velocitat del vent, nuvolositat, precipitació...).
- Directament vinculat amb el paquet informàtic de Sistema d'Informació Geogràfica (SIG) ArcGis i amb EMIT, una base de dades d'emissions que permet la localització geogràfica i quantificació dels focus d'emissió de contaminants d'una forma molt precisa.
- Permet mostrar els resultats tant per a punts específics com per a dominis continus (mapes d'immissió).

### Limitacions del model

A continuació es presenten les principals limitacions del model de dispersió utilitzat, documentades a [37] i per experiència durant el treball:

- El límit de fonts disponibles a modelitzar obliga a separar les regions d'estudi especialment grans en sub-dominis, dotant a la modelització de més complexitat.
- El model utilitzat per avaluar l'efecte "Street Canyon" està simplificat i limitat només al càlcul de concentracions al llarg d'un pla horitzontal.
- Simplificació del model de turbulència dels fluxos.
- No pot tenir en compte explícitament l'impacte de l'àmbit extra-urbà a l'àmbit de les ciutats, més enllà d'estimar-lo per mitjà d'una contaminació de fons.
- Precisament a arrel del punt anterior, el mòdul de càlcul de reaccions químiques pot no ser del tot fiable en determinades condicions de modelització.
- La generació de resultats amb resolució molt alta poden comportar temps de simulació excessivament alts.
- El model no disposa d'eines per detectar quines variables són les més sensibles a un calibratge més efectiu d'aquest. De fet, dur a terme el calibratge del model és molt important a l'hora de simular entorns reals, ja que permet comparar els resultats obtinguts amb les dades reals de contaminació. D'aquesta manera es pot conèixer amb criteri si els resultats generats fidels a la realitat. Aquesta limitació evoca a un procés iteratiu que sovint pot dilatar-se molt en el temps.

### El procés de modelització

Aquest apartat relata quin ha sigut el flux de treball per a la modelització de la qualitat de l'aire.

**NOTA:** tots els processos de l'estudi relacionats amb Sistemes d'Informació Geogràfica s'han realitzat amb el software **ArcGis**.

### Informació d'entrada necessària (inputs)

En aquest apartat es detallen totes les variables d'entrada que cal introduir al model perquè aquest en calculi la dispersió per al cas d'estudi.



### Geometria

Inicialment, cal seleccionar el domini de modelització: la regió per la qual s'avaluaran les emissions i les immissions. En aquest cas, s'analitza una regió específica de l'Eixample de Barcelona. Un entramat viari format per 25 illes (5x5) que defineixen una estructura simètrica. L'alta mobilitat de l'Eixample (i en conseqüència elevades emissions) formen part del criteri d'elecció del domini, en línia amb la problemàtica presentada a l'inici d'aquest treball. Per tant, és d'especial interès conèixer la responsabilitat que té el trànsit en la qualitat de l'aire que respira la població a aquesta regió. La mobilitat als diferents districtes de Barcelona l'any 2017 es mostra a la següent taula.

Taula 7. Mobilitat de cadascun dels districtes de Barcelona (2017).

Districte	Mobilitat (Veh-km/any)	% TOTAL
Ciutat Vella	587.700	4,5%
<b>Eixample</b>	<b>1.990.695</b>	<b>15,3%</b>
Sants-Montjuïc	1.866.067	14,3%
Les Corts	1.186.103	9,1%
Sarrià-Sant Gervasi	1.532.431	11,7%
Gràcia	580.233	4,4%
Horta-Guinardó	1.161.604	8,9%
Nou Barris	1.167.048	8,9%
Sant Andreu	1.358.319	10,4%
Sant Martí	1.613.353	12,4%
<b>TOTAL BCN</b>	<b>13.043.553</b>	<b>100%</b>

Font: Ajuntament de Barcelona.

Com es pot observar a la taula anterior, l'Eixample és doncs el districte de Barcelona amb més mobilitat. El segueix de prop Sants-Montjuïc i Sant Martí.

De fet, el conjunt de tots els vehicles que van circular per l'Eixample l'any 2017 van realitzar un total de 1.990.695 km (és a dir **1.990.695 veh-km/any**).

La regió de l'Eixample analitzada en aquest treball es mostra a la següent figura.





Pel que fa als carrers, s'han utilitzat els trams de via del Graf de Mobilitat de L'Ajuntament de Barcelona (2017). Cada tram de via té associat una longitud i una amplada. **En total s'han modelitzat 82 trams de via del Graf de l'Ajuntament de Barcelona**, circumscrits al domini de modelització.

Es pot observar, doncs, que la majoria de carrers del domini estan envoltats d'edificis majoritàriament alts, formant un "Street Canyon" o canyó urbà. El següent apartat descriu com s'ha procedit per adaptar-lo al cas d'estudi.

## Street Canyon

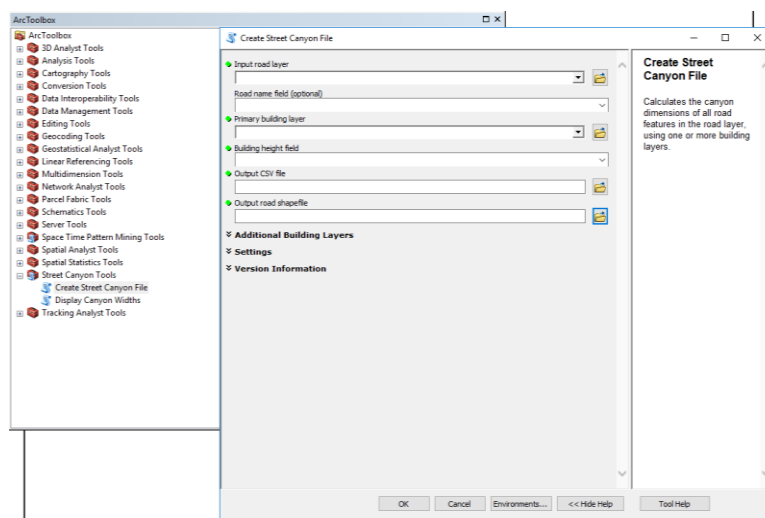
L'ADMS-Urban disposa de mòduls bàsic i avançat per modelitzar els canyons urbans. En aquest cas, s'ha utilitzat el **mòdul avançat** per a major resolució de resultats. Aquesta eina es troba integrada al software de Sistemes d'Informació Geogràfica **ArcGis**.

Aquest mòdul crea, a partir de les propietats geomètriques del domini i dels trams de via (registrades a una capa), un arxiu d'entrada al model. S'ha utilitzat la capa dels carrers (Graf de Barcelona 2017) i la capa amb l'altura dels edificis adjacents a cada carrer (Barcelona Regional). Les propietats introduïdes al mòdul Street Canyon avançat són, doncs:

<b>Name</b>	Nom de la carretera
$x_1, y_1$	Coordenades del primer vèrtex de la via
$x_2, y_2$	Coordenades del segon vèrtex de la via
$H_{avg_i}$	Altura mitjana de l'edifici i
$H_{max_i}$	Altura màxima dels edificis
$H_{min_i}$	Altura mínima dels edificis
$g_i$	Distàncies del centre de la via fins a les parets del canyó urbà.
$b_i$	Longitud del canyó a banda i banda de la via

La següent imatge mostra la interfície de creació de l'arxiu del canyó urbà avançat.

Imatge 20. Creació de l'arxiu de caracterització del canyó urbà (ArcGis) com a input necessari del model. **Mòdul Street Canyon avançat**.



Font: Elaboració pròpia.

Amb aquestes variables es generen les propietats del canyó urbà per a cada tram de via:

$$H = (H_{avgL} + H_{avgR})/2$$

$$H_{max} = \max(H_{avgL}, H_{avgR})$$

$$H_{\Delta i} = 2(H_{avg_i} - H_{min_i})$$

$$g = g_L + g_R$$

$$\alpha_i = 1 - b_i/L_R$$

$$H/g$$

$$\phi_c$$

Altura mitjana global del canyó (m)

Altura mitjana màxima del canyó (m)

Altura mitjana a banda i banda del canyó (m)

Amplada total del canyó (m)

Porositat del canyó ( $L_R$  és la longitud de la carretera)

Proporció entre l'altura i l'amplada del canyó

Orientació del canyó respecte el Nord (°)

La porositat del canyó és aquella proporció de carrer que no té edificis a cap banda. Aquestes propietats es calculen per a cada tram de via i es reuneixen en un document que el model assimila com a caracterització del canyó urbà de la regió modelitzada. L'estructura d'aquest es mostra a la següent imatge.

Imatge 21. Arxiu .csv amb la informació del canyó urbà per a cada tram de via, llest per introduir al model.

ID	Name	X1	Y1	X2	Y2	width_L	avgheight_L	minheight_L	maxheight_L	canyonLength	endLength_L	buildLength_L	width_R	avgheight_R	minheight_R	maxheight_R	canyonLength	endLength_R	buildLength_R
0	V_42	430084	4582863	430080	4582869	0	0	0	0	0	0	0	6.67	21.85	14.27	12	114.42	15.95	114.42
1	V_67	430089	4582749	430070	4582730	8.24	22.56	22.56	22.56	14.8	12.07	14.8	11.94	24.59	21.57	24.74	15.35	115.52	15.35
2	V_105	430050	4582751	430096	4582845	11.79	22.61	14.54	28.56	113.46	8.43	113.46	8.27	23.29	18.43	28.46	113.49	8.36	113.49
3	V_132	430050	4582940	430050	4582889	13.77	23.36	13.44	32.84	60.56	10.87	60.56	16.51	21.97	18.83	24.22	57.46	9.58	57.46
4	V_179	430112	4582943	430066	4583036	10.15	23.26	13.43	28.69	113.3	8.62	113.3	10.14	21.39	19.47	23.37	113.45	8.37	113.45
5	V_314	430113	4583132	430218	4583038	9.13	22.66	20.53	26.4	113.66	10.82	113.66	0	0	0	0	0	0	0
6	V_731	430404	4582857	430451	4582609	8.38	15.79	8.71	19.97	56.71	7.98	56.71	11.39	23.75	21.19	27.44	59.18	8	59.18
7	V_748	430084	4582953	430059	4582956	11.78	25.4	18.9	30.01	86.21	6.78	86.21	8.16	23.12	17.74	26.45	114.2	6.91	114.2
8	V_749	430093	4582956	430047	4582703	11.7	17.08	8.95	22.19	54.49	11.08	54.49	8.09	28.53	19.05	30.41	54.84	10.52	54.84
9	V_763	430096	4582845	430089	4582749	7.79	23	19.48	29.47	113.95	8	113.95	12.14	23.18	19.15	24.88	113.7	8.45	113.7
10	V_778	430783	4582842	430089	4582939	10.84	21.19	15	29.8	114.01	10.66	114.01	9.43	22.08	17.77	27.04	114	10.76	114
11	V_800	430785	4583032	430079	4582936	0	0	0	0	0	0	0	10.57	22.82	15.56	29.5	114.09	9.72	114.09
12	V_4191	430364	4582834	430276	4582531	0	0	0	0	0	0	0	29.37	21.75	16.26	30.12	114.22	11.38	114.22
13	V_69	430098	4582961	430377	4582446	8.32	23.58	20.71	27.91	143.52	11.34	143.52	11.39	23.08	18.84	25.71	142.62	11.98	142.62
14	V_729	430388	4582469	430466	4582230	0	0	0	0	0	0	0	6.17	25.49	18.99	31.81	146.61	13.91	146.61
15	V_4190	430353	4582337	430364	4582434	0	0	0	0	0	0	0	29.5	25.08	5.87	29.78	115.55	7.8	115.55
16	V_70	430377	4582446	430364	4582434	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	V_88	430093	4582856	430498	4582561	8.03	21.8	17.44	27.87	93.21	32.98	93.21	11.8	21.17	16.27	26.42	114.22	11.47	114.22
18	V_712	430098	4582461	430088	4582469	8.09	24.38	23.08	25.77	114.61	7.36	114.61	11.77	23.1	16.36	31.28	114.86	7.34	114.86
19	V_176	430094	4582729	430306	4582741	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	V_317	430014	4582839	430003	4582828	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	V_726	430123	4582940	430218	4582849	8.06	24.87	17.41	29.53	114.15	9.26	114.15	11.82	24.26	15.91	27.73	114.32	8.89	114.32
22	V_752	430112	4582943	430218	4583038	13.33	20.87	14.58	27.14	114.37	10.55	114.37	8.85	22.56	18.81	28.61	114.45	10.25	114.45
23	V_4193	430185	4582830	430094	4582729	0	0	0	0	0	0	0	29.5	22.56	16.13	32.84	110.26	17.15	110.26
24	V_4194	430094	4582729	430003	4582828	0	0	0	0	0	0	0	29.62	25.5	18.11	29.31	115.68	11.02	115.68
25	V_103	430287	4582444	430044	4582637	11.17	23.45	13.32	31.12	138.08	13.21	138.08	8.17	24.79	13.98	30.12	119.81	11.65	119.81
26	V_134	430110	4582753	430195	4582641	14.53	25.22	21.11	31.47	136.33	10.69	136.33	15.09	27.14	19.61	32.84	133.77	11.23	133.77
27	V_177	430106	4582741	430165	4582797	9.85	29.31	29.31	29.31	64.6	12.78	64.6	8.28	20.98	15.89	22.61	69.28	12.06	69.28
28	V_727	430218	4582949	430130	4582753	8.52	21.66	18.09	27.23	108.98	6.15	108.98	11.75	23.79	17.83	29.61	109.35	8.54	109.35
29	V_751	430077	4582846	430112	4582943	11.34	20.38	13.52	30.35	109.3	10.93	109.3	8.92	18.45	14.42	23.34	109.44	16.87	109.44
30	V_4192	430276	4582531	430248	4582561	0	0	0	0	0	0	0	29.67	33.09	26.7	33.12	27.77	13.26	27.77
31	V_102	430276	4582531	430287	4582544	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	V_135	430195	4582841	430185	4582830	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	V_104	430404	4582857	430455	4582707	11.84	24.09	16.37	32.96	59.48	8.6	59.48	8.06	22.55	18.04	30.47	62.97	8.45	62.97
34	V_133	430407	4582846	430362	4582803	13.02	16.8	16.8	16.8	48.83	11.13	48.83	16.42	30.01	28.26	31	50.36	11.89	50.36
35	V_730	430110	4582753	430404	4582657	8.59	28.59	16.8	32.96	108.14	14.24	108.14	10.86	19.2	13.32	21.29	108.19	14.38	108.19
36	V_750	430050	4582751	430407	4582846	11.58	22	16.8	27.37	108.35	11.88	108.35	8.43	19.24	17.45	22.22	108.37	11.89	108.37
37	V_178	430218	4582949	430112	4582943	11.39	21.46	15.89	29.75	113.83	8.9	113.83	8.9	21.14	16.32	23.34	114.48	6.93	114.48
38	V_315	430218	4583038	430123	4582945	8.95	21.45	14.58	29.53	114	10.49	114	0	0	0	0	0	0	0
39	V_316	430123	4582945	430071	4582893	8.47	28.27	22.49	27.73	60.06	11.94	60.06	0	0	0	0	0	0	0

Font: Elaboració pròpia.

## Emissions

Un cop han quedat definides la geometria de les parcel·les, canyó urbà i trams de via del domini de modelització, es calculen les emissions generades pel trànsit al conjunt de tots els carrers de l'àmbit d'anàlisi. Cal, doncs, realitzar un inventari d'emissions circumscrit a la regió d'estudi.

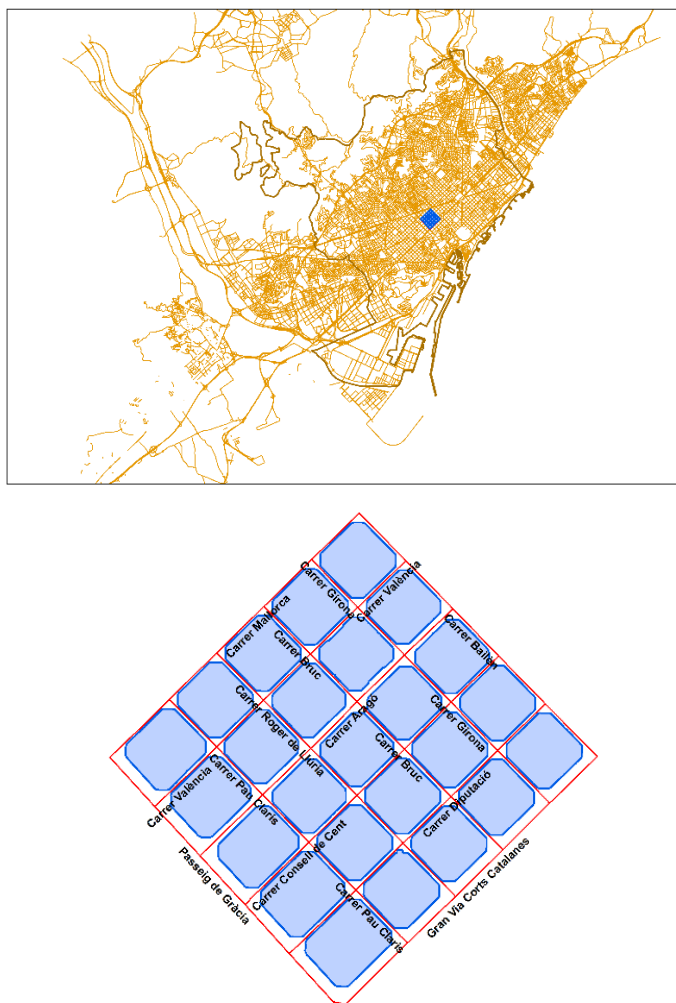
**NOTA IMPORTANT:** Aquest treball posa l'èmfasi especialment en l'impacte del sector viari, per tant només s'han modelitzat explícitament les emissions provinents dels vehicles. Altres sectors que contribueixen a la contaminació urbana (sector domèstic, comercial i serveis, industrial, port, aeroport, etc...) no s'han tingut en compte. D'aquesta manera l'efecte del trànsit no queda diluït en els altres sectors d'emissió un cop es generen els resultats d'immissió.

Per quantificar les emissions generades pel trànsit, és necessari inicialment disposar d'informació de la mobilitat de la regió d'estudi. També cal informació relativa a la naturalesa del parc circulant.

## Quantificació de la mobilitat del domini de modelització

Per conèixer la mobilitat (en veh-km/any) de cada tram de via, s'ha utilitzat les dades de circulació del Graf de l'Ajuntament de Barcelona (2017). La següent imatge mostra els carrers modelitzats (en vermell).

Imatge 22. **A dalt**, Graf de mobilitat de l'Ajuntament de Barcelona (2017). En blau, domini de modelització al context de la ciutat. **A baix**, detall del domini de modelització.



Font: Barcelona Regional i Ajuntament de Barcelona.

La mobilitat referent a tot el domini de modelització resulta en **71.145.111,16 veh-km/any**. El graf també s'ha utilitzat per determinar la velocitat mitjana de totes les vies del domini: **25,1 km/h**. La següent taula resumeix aquests paràmetres de mobilitat i velocitat.

Taula 8. Mobilitat i velocitat mitjana de les vies del domini de modelització.

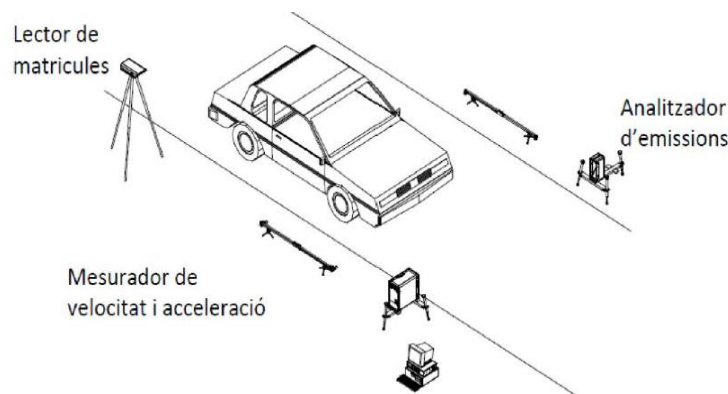
Domini de modelització	
Mobilitat global	Velocitat mitjana
71,14 Mveh-km/any	25,1 km/h

Font: Ajuntament de Barcelona.

### Caracterització del parc circulant del domini de modelització

Per conèixer com són els vehicles que circulen per la regió d'estudi s'han utilitzat dades de l'Ajuntament de Barcelona de l'any 2017. La mobilitat específica de cadascuna de les subcategories de vehicle s'ha obtingut gràcies a l'explotació de dades de [38]. L'estudi referent a aquesta font consistia en la realització d'una campanya de mesures reals de la mobilitat de l'AMB i especialment de Barcelona. Es van realitzar mesures de velocitat, acceleració i contaminació a peu de carrer sense interrompre la normal circulació de vehicles gràcies a sistemes basats en una tecnologia anomenada RSD<sup>1</sup>. Aquests sistemes es col·loquen a la carretera (lateral de la via) en la disposició que es mostra a la imatge següent.

Imatge 23: Esquema dels aparells de l'RSD, mesura d'emissions dels vehicles



Font: [38]

Aquests equips detecten, per una banda, la matrícula del vehicle que passa pel seu davant. La informació d'aquesta és registrada i contrastada amb la base de dades de la DGT, que caracteritza les especificacions tècniques del vehicle: **tipologia, tipus de combustible, antiguitat, cilindrada, potència, pes, entre d'altres variables d'interès**. Es va desplegar aquesta tecnologia en punts estratègics i representatius de la mobilitat de la ciutat. A la vegada, els equips RSD quantifiquen les emissions reals (amb un error acotat

<sup>1</sup> Remote Sensing Device



al  $\pm 15\%$ ) dels contaminants que evacuen els vehicles pel tub d'escapament per mitjà de raigs infraroigs i ultraviolats de baixa intensitat. Són capaços de mesurar:

- Monòxid de carboni (CO)
- Hidrocarburs (HC)
- Òxids de nitrogen ( $\text{NO}_x$ )
- Diòxid de nitrogen ( $\text{NO}_2$ )
- Material particulat (PM)

### Explotació de les dades del RSD per a la caracterització del parc circulant del domini de modelització

Les dades del RSD ([38]) s'han utilitzat per aquest treball; a Barcelona es van realitzar mesures en un total de 13 punts de la ciutat. La ubicació de cadascun dels punts de mesura es poden consultar a la següent imatge:

Imatge 10: Punts de mesura a les vies urbanes de Barcelona de la campanya RSD realitzada l'any 2017.



Font: [38]

Es van identificar doncs un total de **39.359 vehicles** només a l'àmbit urbà de Barcelona. La ubicació dels punts de mesura, així com els vehicles identificats a cada punt es poden consultar a la taula següent.

Taula 9. Ubicació i registres als punts de mesura de la campanya RSD. Any 2017.

Punt mesura	Municipi	Ubicació	vehicles identificats	% vehicles
BCN01	Barcelona	Carrer de Santaló	4.942	12,6%
BCN03	Barcelona	Carrer d'Arenys	34	0,1%
BCN04	Barcelona	Via Augusta	4.437	11,3%
BCN05	Barcelona	Carrer d'Olzinelles	7.268	18,5%
BCN06	Barcelona	Carrer del Freser	4.465	11,3%
BCN07	Barcelona	Via Júlia	3.088	7,8%
BCN08	Barcelona	Rambla Fabra i Puig	4.638	11,8%
BCN09	Barcelona	Carrer Tuset	1.277	3,2%
BCN10	Barcelona	Avinguda Vallcarca	5.701	14,5%
BCN11	Barcelona	Gran Via	3.509	8,9%
TOTAL	*	*	39.359	100%

Font: [38]

D'aquesta manera, i a cada punt de mesura, es van registrar i **caracteritzar** els vehicles del parc circulant de Barcelona. Com són els vehicles que circulen pel domini de modelització. El graf de Barcelona ha servit per quantificar la mobilitat del parc circulant del domini i l'estudi del RSD per caracteritzar la seva mobilitat.

A aquest parc circulant se li assigna un factor d'emissió mitjà per a cada contaminant d'anàlisi. En aquest cas, s'analitzen les emissions de NO<sub>x</sub> i PM<sub>10</sub>. Per a aquest fi, s'ha utilitzat el software COPERT, en la seva versió 5.0.

COPERT consisteix en un software que, donat un parc circulant d'entrada, permet quantificar les emissions d'aquest. També necessita informació meteorològica.

Per calcular les emissions, COPERT compta amb una classificació dels vehicles en funció de la mida, energia de propulsió i tecnologia EURO. A la vegada, compta amb factors d'emissió (basats en *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016*) per a cada tipus de vehicle i condició de conducció (emissions amb el motor fred o calent). També és capaç de calcular les emissions fruit de l'evaporació dels combustibles. Per tant, s'obté com a sortida les emissions anuals (tn/any) de cada tipus de vehicle per cada contaminant.

Les mesures que es van dur a terme a peu de carrer durant la campanya del RSD ([38]) van demostrar que els valors reals d'emissió es veuen incrementats respecte els valors de sortida que proporciona COPERT. Es poden consultar a la taula següent:

Taula 10. Increment entre les mesures d'emissió reals (RSD) i les que calcula COPERT.

Increment RSD respecte COPERT (%)	NO <sub>x</sub> [%]	PM <sub>10</sub> [%]
Turismes	14,0%	-1,0%
Furgonetes (LDV)	9,8%	10,5%
Camions (MDV & HDV)	90,7%	39,7%

Autobusos i Autocars	0,5%	10,6%
Motos i ciclomotors	194,5%	183,2%
<b>TOTAL</b>	<b>29,1%</b>	<b>16,9%</b>

Font: Barcelona Regional en base a dades de RSD i EMEP/EEA 2016

**Aquests increments per tipologia s'han aplicat al parc circulant del domini de modelització un cop calculats els valors de COPERT.**

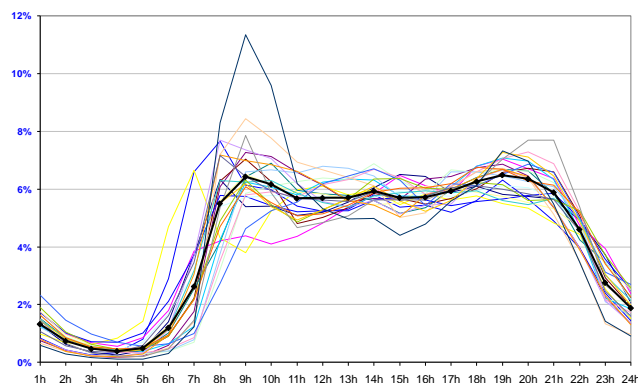
Amb tot això, les dades (COPERT+RSD) es processen amb una eina de càlcul creada per Barcelona Regional amb la finalitat d'obtenir un factor d'emissió mitjà del parc circulant per a NO<sub>x</sub> i per a PM<sub>10</sub> respectivament.

Finalment, els factors d'emissió mitjans s'associen a les vies del domini de modelització per mitjà d'ArcGis. Els trams de via ja es poden considerar doncs fonts d'emissió i estan llestes per ser modelitzades per l'ADMS-Urban.

### *Perfils temporals d'emissions*

Les emissions dels vehicles que circulen pel domini de modelització no són constants al llarg del temps. El comportament depèn del funcionament econòmic i social de la ciutat. Així doncs, les emissions són majors en hores puntes de circulació, mentre que disminueixen dràsticament en hores vall. També disminueixen els caps de setmana i en períodes de vacances. És per això que s'ha assignat un perfil d'emissions diari, setmanal i mensual als diferents trams de via (fonts d'emissió) d'emular el seu comportament de manera més realista. Els perfils s'han construït a partir de les dades dels aforaments instal·lats a Barcelona l'any 2017 [39]. Els perfils horaris es mostren a la següent taula:

Gràfic 11: Perfil horari de circulació en dia laborable per a diferents estacions (diferents colors) d'aforament de Barcelona

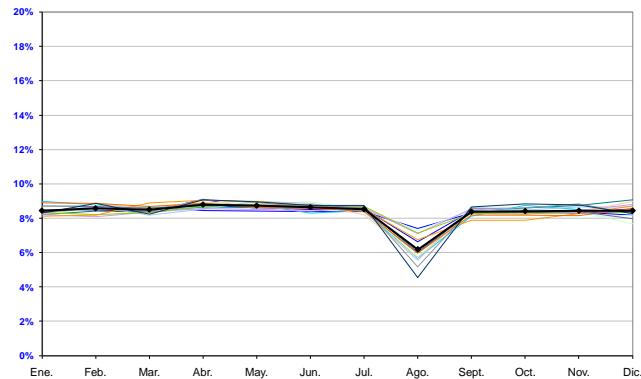


Font: Barcelona Regional en base a [39]

Els perfils mensuals es mostren a la següent taula:



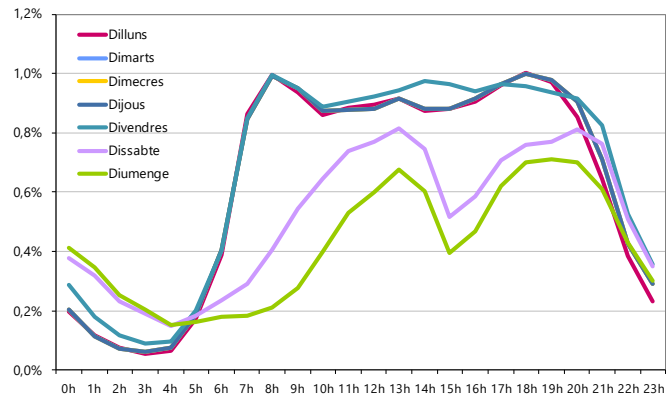
Gràfic 12: Perfil mensual de circulació en dia laborable per diferents estacions (diferents colors) d'aforament de Barcelona



Font: Barcelona Regional en base a [39]

Els perfils horaris per a cada dia de la setmana es mostren a la següent taula.

Gràfic 13: Perfil tipus de circulació horària/setmanal (a dalt) de Barcelona.



Font: Barcelona Regional en base a [39]

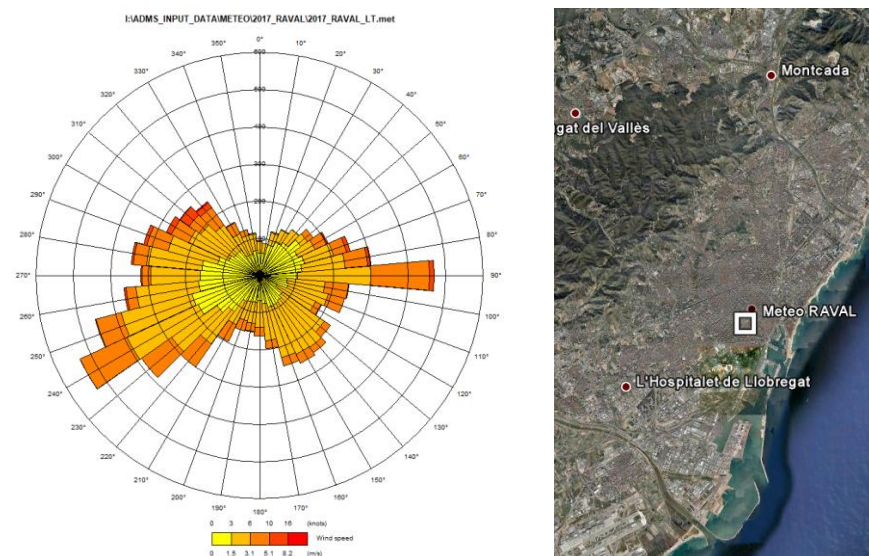
Com es pot observar als anteriors gràfics, la mobilitat es concentra especialment a les hores centrals del dia (de 8h a 20h) i decau a la nit. Pel que fa al comportament de la mobilitat mensual, aquesta disminueix a l'agost (coincideix amb període de vacances per a molts ciutadans).

### Meteorologia

Un altre input necessari per el model de dispersió de contaminants són les dades meteorològiques a les quals està sotmès el domini de modelització. Per això, s'ha utilitzat registres reals de l'estació del Servei Meteorològic de Catalunya del Raval de Barcelona: 8.760 registres meteorològics horaris.

La següent imatge mostra la rosa dels vents i ubicació de l'estació METEO del Raval-BCN.

Imatge 24: Ubicació de l'estació meteorològica del Raval i la seva Rosa dels Vents (2017).



Font: ADMS-Urban i Barcelona Regional amb dades del Servei Meteorològic de Catalunya.

Com es pot observar a l'anterior imatge, la rosa dels vents de Barcelona està predominada per vents de component Est i Oest.

Les mitjanes de les principals variables meteorològiques introduïdes al model es mostren a la taula següent [40].

Taula 11. Variables meteorològiques mitjanes de la informació introduïda al model.

Precipitació (mm)	Humitat Relativa (%)	Radiació solar incident (MJ/m <sup>2</sup> )	Velocitat del vent (m/s)	Temperatura (°C)
442,1	63 %	16,5	2	18,4

Font: [40].

## Escenaris d'estudi

L'evolució del vehicle elèctric als propers anys és incert. Si bé és cert que la tecnologia avança (sobretot aplicada a les bateries), l'encara gran presència del vehicle de combustió interna a tots els àmbits de la mobilitat fa que la predicció dels vehicles elèctrics venuts i en circulació els propers anys sigui una tasca complexa i no absent de suposicions.

En aquest sentit, la Unió Europea ha realitzat les seves prediccions de vehicle elèctric pels propers anys en base a diversos estudis que ha realitzat. Així doncs, es pot parlar d'escenaris més o menys optimistes segons el grau d'evolució tecnològica, econòmica i social.

Aquest treball analitza l'impacte del sector viari a la qualitat de l'aire a la regió ja esmentada, posant especial èmfasi en el paper que juguen els vehicles alternatius i elèctric. Per aquest fi, s'analitza la **situació real de l'any 2017** (gràcies al parc circulant real obtingut) i posteriorment **diversos escenaris del parc circulant, amb presència creixent del vehicle elèctric**. Per tant, s'han calculat dos parcs circulants més a partir del parc real del 2017. La descripció de cada escenari s'exposa a continuació.

- **Escenari Base.** Emmarcat a l'any **2017**, es tracta de l'escenari de partida. Amb la tecnologia i parc circulant de Barcelona **real** d'aleshores (RSD i Ajuntament de Barcelona, 2017). Aquest escenari contempla un percentatge d'electrificació global de 3,8% . No contempla les restriccions que l'Ajuntament de Barcelona durà a terme a partir del gener del 2020 (Zona de Baixes Emissions).
- **Escenari MIDxEV.** És una evolució molt optimista de l'escenari Base pel que fa al desenvolupament tecnològic, basat en [41]: disposa de molts vehicles elèctrics i la majoria dels vehicles de combustió del parc són d'última generació (tecnologia EURO 5/V i EURO 6/VI). Les taules que caracteritzen aquest escenari es troben a l'Annex.
- **Escenari Sense Etiqueta Groga.** Aquest escenari és una evolució de l'escenari que vol implementar l'Ajuntament de Barcelona al 2020 (només podran circular per la zona intra-Rondes els vehicles amb etiqueta ambiental [42]). En aquest escenari, tots els vehicles amb distintiu B (groc) són substituïts per vehicles elèctrics. Per tant, només circulen els vehicles amb distintiu C, ECO i Zero (veure apartat d'etiquetes ambientals de la DGT). Es contempla una electrificació global del 62,3% del parc circulant.  
Per quantificar els vehicles substituïts s'ha utilitzat la classificació EURO dels mateixos.

Així doncs, els escenaris es resumeixen a la següent taula.

Taula 12. Resum dels escenaris amb la proporció de mobilitat elèctrica global de cadascun d'ells.

Escenari	% Parc elèctric (*)	Fonts per determinar el parc de cada escenari:
Base	3,8%	[33] AMB 2017 Caracterització dels vehicles i les seves emissions a l'àrea metropolitana de Barcelona Graf de l'Ajuntament de Barcelona 2017
MIDxEV	23,0%	[34] Hill N and Bates J 2020 Europe 's Clean Mobility Outlook : Scenarios for the EU light-duty vehicle fleet , associated energy needs and emissions , 2020–50 Graf de l'Ajuntament de Barcelona 2017
SENSE ETIQUETA GROGA	62,3%	[35] Àrea Metropolitana de Barcelona 2017 Programa metropolità de mesures contra la contaminació atmosfèrica Graf de l'Ajuntament de Barcelona 2017

Font: elaboració pròpia. (\*) Quadre 1

Quadre 1. Consideració important en relació a electrificació del parc circulant dels diferents escenaris.

**NOTA IMPORTANT (\*).**

El concepte d'electrificació d'un parc no és senzill. I és que cal pensar quins i com es substituiran aquells vehicles de combustió que donin pas als vehicles elèctrics (mantenint la mobilitat global constant). És a dir, com afectarà l'electrificació a cada tipologia de vehicle (turisme, furgoneta, camió, moto...) i a cada subcategoria d'aquests (mida, combustible, tecnologia EURO...). Per tant, dos parcs que globalment presentin la mateixa electrificació a nivell global poden arribar a ser molt dispars pel que fa a les emissions.

Els escenaris MIDxEV i Sense Grogia tenen percentatges d'electrificació global molt diferents (24,3% i 62% respectivament) però no presenten la mateixa diferència a nivell d'emissions, tal i com es podrà constatar en els següents apartats (Taula 13). Això és degut a que les distribucions dels vehicles de combustió a cada escenari no són iguals.

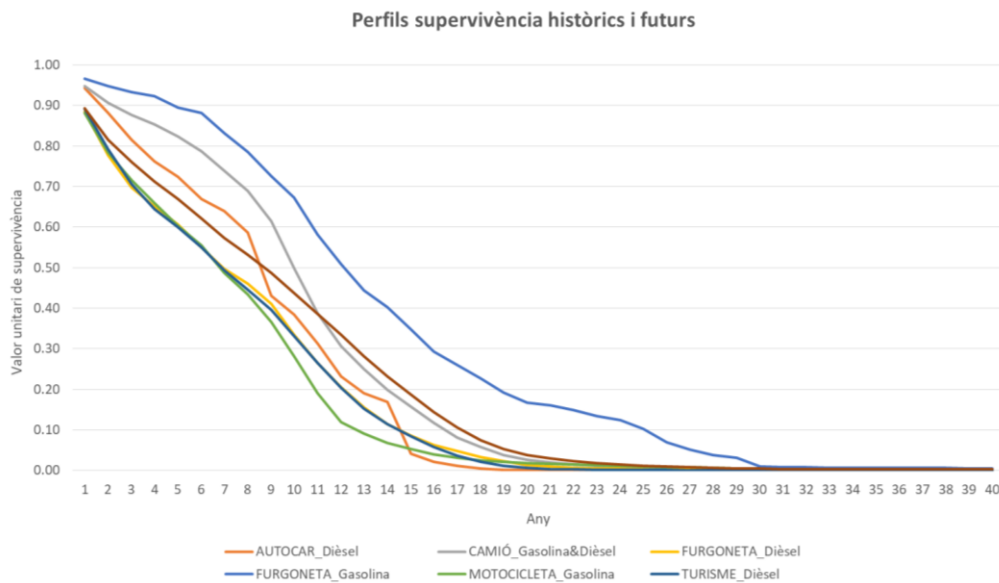
A continuació es descriu el procediment de càlcul dels parcs circulants.

### Determinació del parc mòbil futur

La naturalesa del parc circulant del futur és una combinació de vehicles nous, vehicles nous que encara circulen i vehicles que es donen de baixa. D'aquesta manera es pot observar l'efecte positiu que té renovar el parc actual per un altre de més avançat tecnològicament parlant. Cal tenir en compte que la baixa d'un vehicle de la circulació pot no ser causat només per raons tècniques. També pot ser substituït per raons econòmiques i/o socials. La combinació d'aquests tres factors, juntament amb les matriculacions futures, determinen la renovació i composició del parc circulant any a any. S'ha utilitzat una eina creada per Barcelona Regional per al càlcul dels parcs circulants, basat en l'aplicació de corbes de supervivència o "Survival Curves".

Les corbes de supervivència és una eina que s'utilitza en sistemes on els diferents agents que hi participen pateixen una degradació al llarg del temps (com pot ser un grup de bactèries, un col·lectiu de persones amb una determinada malaltia, etc...). Les corbes s'han aplicat a tots els vehicles, de manera que van es van donant de baixa poc a poc. Per un major realisme, cada tipus de vehicles té associat un perfil de supervivència propi. Aquestes corbes s'han extret analitzant les dades del parc circulant de la mostra de l'estudi RSD, tenint en compte l'antiguitat mitjana de cada tipologia de vehicle. Es mostren a la imatge següent.

Imatge 25: Corbes de supervivència per a cada tipus de vehicle



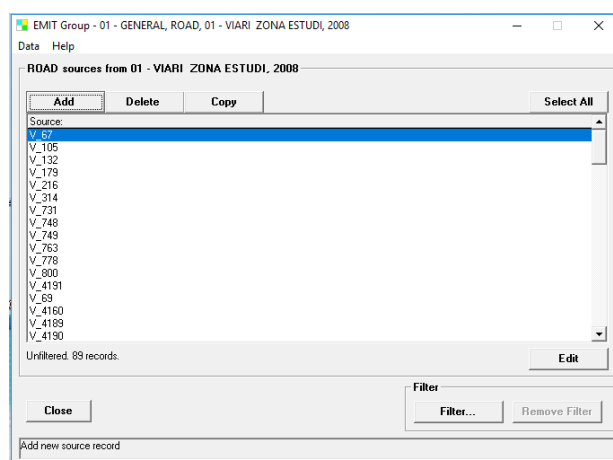
Font: Barcelona Regional

Així doncs, fent un balanç entre vehicles nous, seminus i donats de baixa, s'ha projectat el parc circulant de Barcelona del 2017 als altres dos escenaris (MIDxEV i Sense Grogà). Les característiques a nivell de mobilitat de cada escenari es mostren al capítol de l'inventari d'emissions.

### Inventari d'emissions

Un cop les emissions estan quantificades i associades a cada carretera, se les importa a un software anomenat EMIT. Aquest software, adjunt a l'ADMS-Urban, serveix per reunir els diferents inventaris segons el seu sector (viari, industrial, aeroport, port...). La capa de les carreteres amb un factor d'emissió associat s'importen a l'EMIT (següent imatge).

Imatge 26. Procés d'importació de la capa de carreteres l'EMIT.



Font: Barcelona Regional

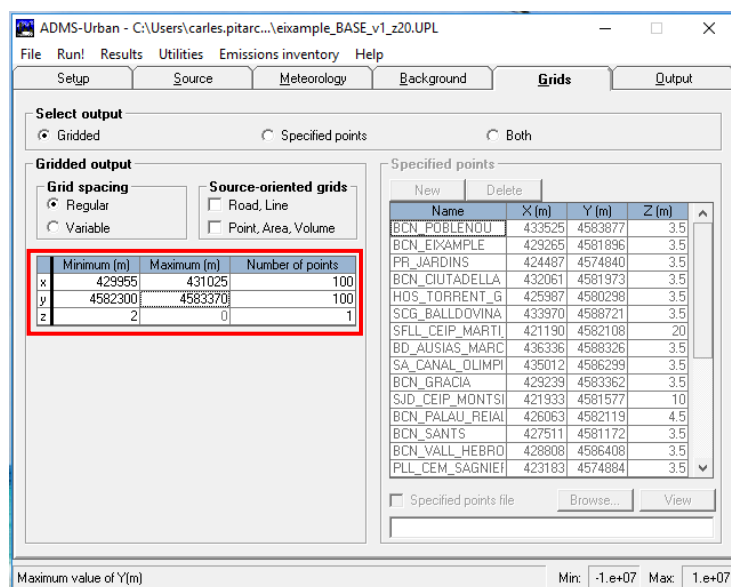
Un cop l'inventari georeferenciat ha sigut processat per l'EMIT, ja es pot importar a l'ADMS-Urban. L'EMIT també permet confeccionar mapes d'emissió del domini de modelització.

### Configuració de sortida del model

Un cop s'han introduït a l'ADMS-Urban tots els inputs presentats anteriorment i també l'inventari d'emissions, cal escollir quins i com seran els resultats es volen obtenir.

Els càlculs d'immissió es realitzen en el marc d'un mallat que cal ubicar i escollir-ne la seva resolució. En aquest cas, s'ha escollit una resolució de sortida de 10 m; és a dir, els càlculs es realitzen cada 10 metres. El mallat és rectangular de mides **1070x1070 m** i les seves coordenades es presenten a continuació.

Imatge 27. Coordenades i resolució del mallat de sortida de l'ADMS-Urban.



Font: Barcelona Regional

Cal escollir per quins contaminants es vol realitzar la modelització. Es programa l'ADMS-Urban perquè calculi la concentració per a NO<sub>2</sub> i PM<sub>10</sub>. Els resultats es calculen en mitjana anual.

### El procés de simulació i obtenció de resultats

La modelització s'ha realitzat en màquina que disposa de dos processadors Intel® Xeon® CPU E5-2690 de 2,6 GHz, amb 16 GB de memòria RAM.

Les simulacions es realitzen en paral·lel gràcies a un software anomenat Run Manager, que les gestiona indicant el data d'inici, data de finalització previsible i duració un cop acabada. Aquesta informació és útil a l'hora de comptabilitzar les hores de computació totals; s'han invertit un total de **303,04 h** en computació.

Un cop acabada la modelització es generen els resultats, presentats al següent capítol.

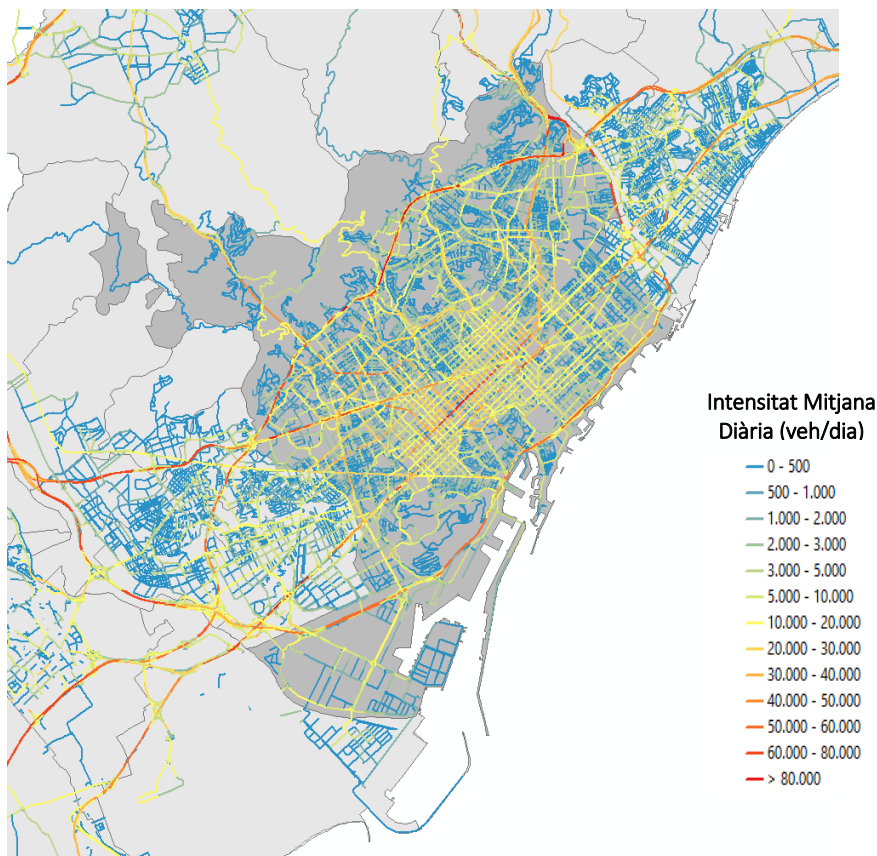
## Inventari d'emissions detallat

Aquest capítol presenta i caracteritza la mobilitat i les emissions de cada escenari, obtingudes amb la metodologia COPERT+RSD, ja explicada prèviament. Es mostren els resultats amb diagrames de sectors. Les taules per a cada escenari es troben a l'Annex.

### Mobilitat per tipologia de vehicle i subcategoria

La mobilitat del domini s'ha obtingut a partir del Graf de l'Ajuntament de Barcelona de l'any 2017. La següent imatge mostra la intensitat mitjana diària de vehicles de les vies del graf per a tota la ciutat (graf en la seva totalitat).

Imatge 28: Mapa de la xarxa viària de Barcelona (2017) amb la representació de la Intensitat Mitjana Diària (IMD).

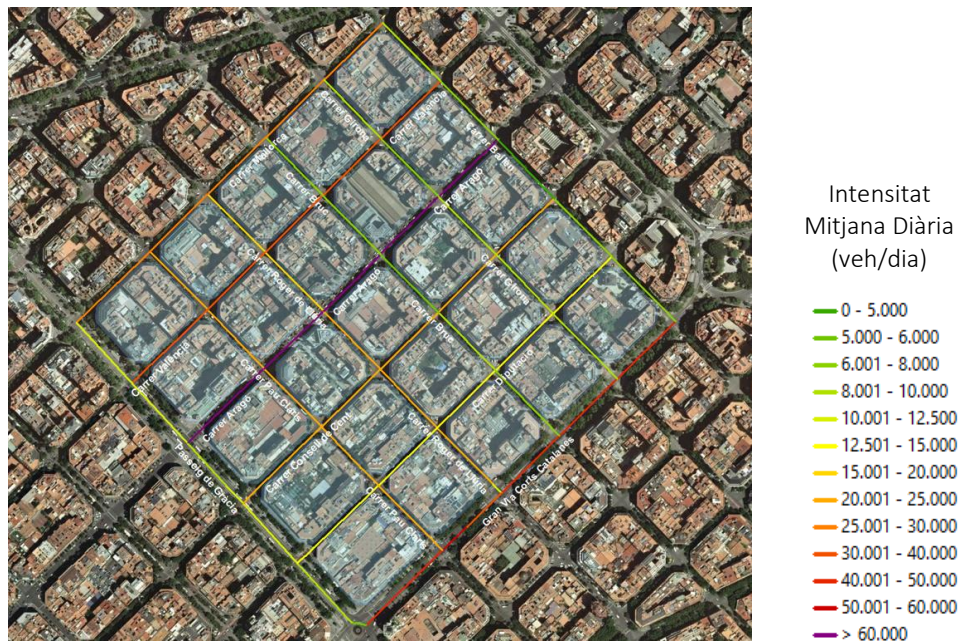


Font: Aranya de trànsit de l'Ajuntament de Barcelona, 2017

A continuació es presenta l'entramat viari del domini de modelització, amb els valors de IMD (Intensitat Mitjana Diària) per a cada tram de via (procedents del Graf).



Imatge 29: Mapa de la xarxa viària del domini de modelització amb la representació de la Intensitat Mitjana Diària (IMD) dels diferents trams de via que el conformen.

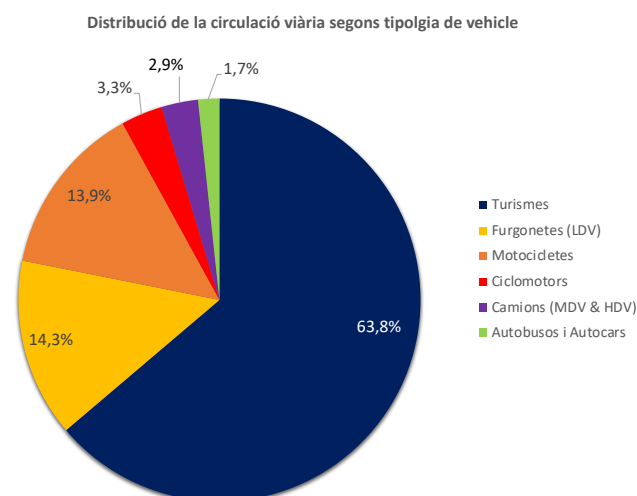


Font: Aranya de trànsit de l'Ajuntament de Barcelona, 2017

**NOTA IMPORTANT:** La mobilitat global en valor absolut s'ha mantingut constant tots els escenaris, amb un valor de **71.145.111,16 veh-km/any** (Graf de Mobilitat de l'Ajuntament de Barcelona)

Pel que fa a la distribució de la mobilitat en funció de la tipologia de vehicle, aquesta s'ha mantingut constant per a tots els escenaris d'anàlisi. Es mostra al següent gràfic:

Imatge 30: Distribució de la mobilitat (respecte els veh-km/any recorreguts) segons tipologia de vehicle al domini de modelització. Aplicat a tots els escenaris (Base, MIDxEV i Sense Etiqueta Groga)



Font: Elaboració pròpia en base a RSD i Ajuntament de Barcelona



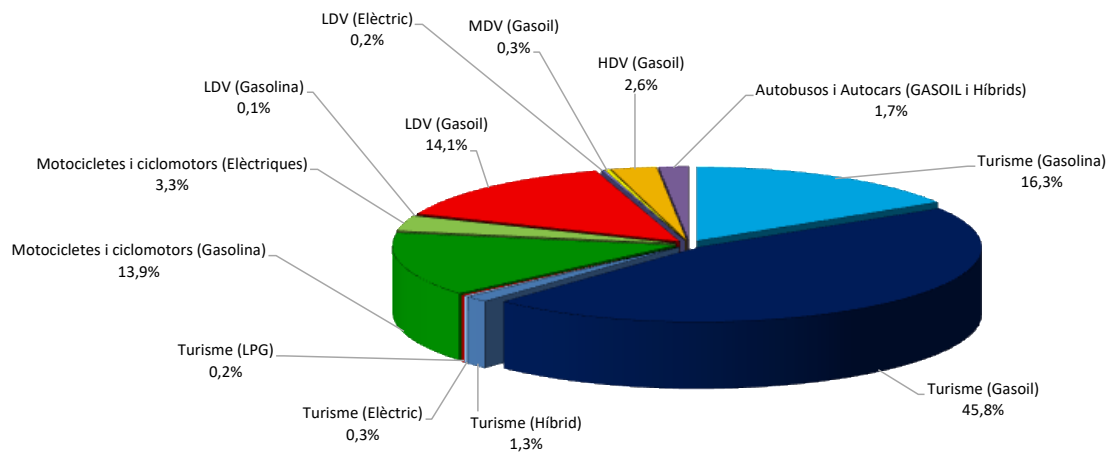
## Escenari Base

### Circulació viària

Aquest apartat recopila informació relacionada amb la circulació viària (veh-km/any) per al **Escenari Base 2017**

La distribució de la circulació del model de modelització per aquest escenari es mostra en el gràfic de sectors següent, agregat per tipus de vehicle.

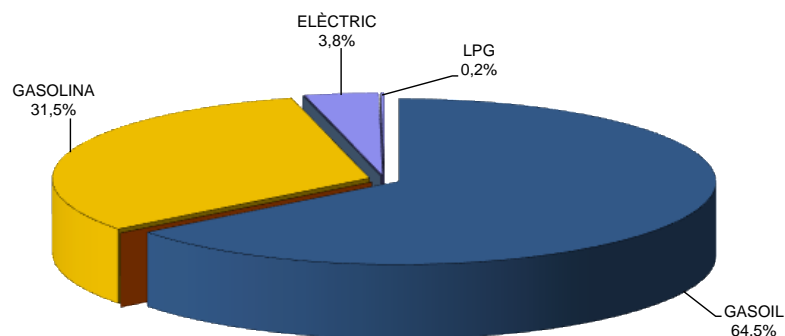
Imatge 31: Distribució de la circulació viària al domini de modelització per tipus de vehicle per a un total de 71,14 Mveh-km/any. Escenari Base 2017.



Font: Barcelona Regional

La distribució de la circulació de la xarxa del domini de modelització agregada per tipus de combustible es mostra en el gràfic de sectors següent.

Imatge 32: Distribució de la circulació viària al domini de modelització per energia de propulsió per a un total de 71,14 Mveh-km/any. Escenari Base 2017.



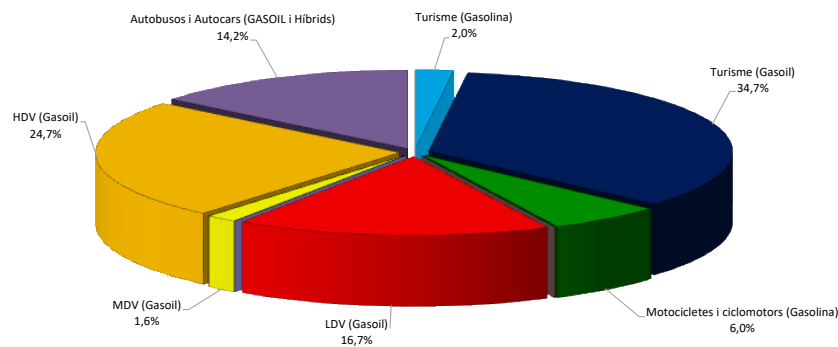
Font: Barcelona Regional

Com es pot observar a l'anterior gràfic de sectors, el gasoil representa el combustible clarament majoritari (64,5%), seguit de la gasolina (31,5%). L'electricitat és la tercera i pràcticament última energia de propulsió en aquest escenari, degut en gran part a les motos i ciclomotors elèctrics.

### Emissions de NO<sub>x</sub> i PM<sub>10</sub>

A continuació es mostra un gràfic de sectors de les emissions de NO<sub>x</sub> de l'escenari Base, distribuïdes per tipologia de vehicle i energia de propulsió.

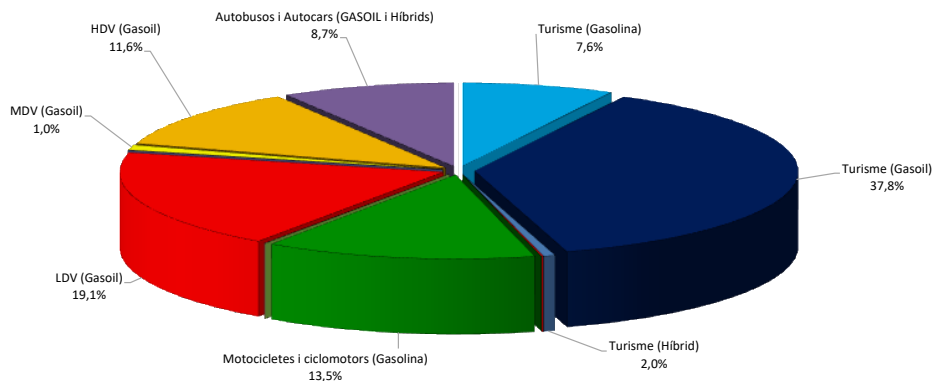
Imatge 33: Distribució de les emissions de NO<sub>x</sub> per tipus de vehicle al domini de modelització per a un total de 76,31 tn/any. Mitjana de 1,0727 g/km. Escenari Base 2017.



Font: Barcelona Regional

A continuació es mostra un gràfic de sectors de les emissions de PM<sub>10</sub> de l'escenari Base, distribuïdes per tipologia de vehicle i energia de propulsió.

Imatge 34: Distribució de les emissions de PM<sub>10</sub> per tipus de vehicle al domini de modelització per a un total de 3,44 tn/any. Mitjana de 0,0483 g/km.



Font: Barcelona Regional

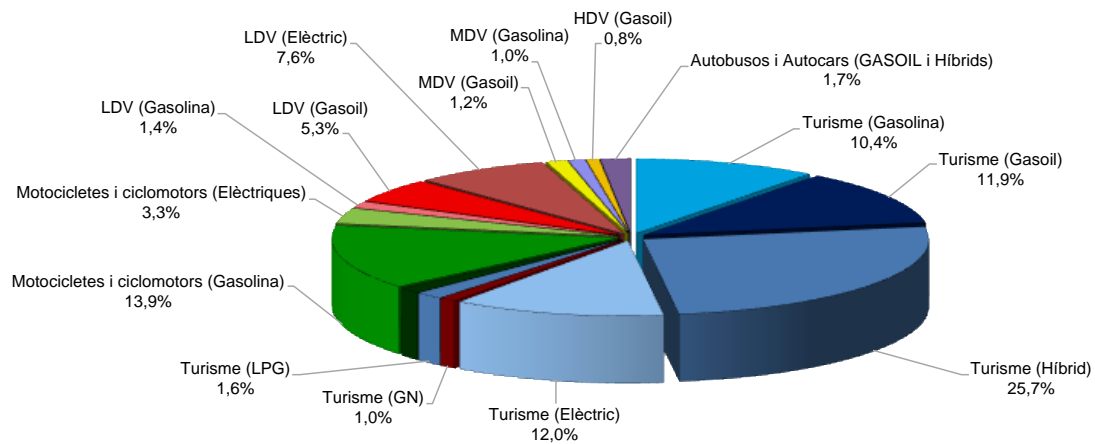
## Escenari MIDxEV.

### Circulació viària

Aquest apartat recopila informació relacionada amb la circulació viària (veh-km/any) per al **Escenari MIDxEV**.

La distribució de la circulació del model de modelització per aquest escenari es mostra en el gràfic de sectors següent, agregat per tipus de vehicle.

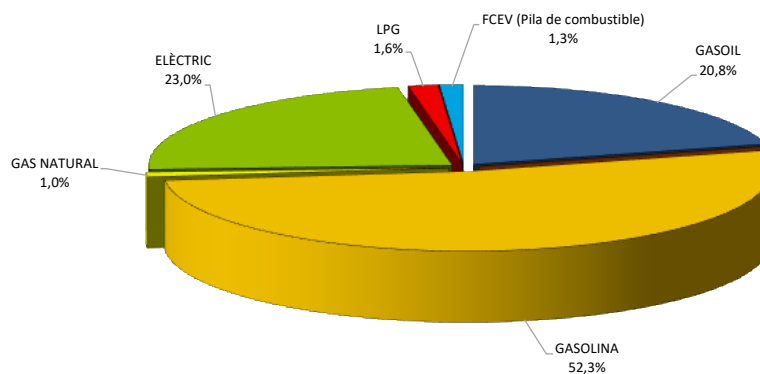
Imatge 35: Distribució de la circulació viària al domini de modelització per tipus de vehicle per a un total de 71,14 Mveh-km/any. Escenari MIDxEV.



Font: Barcelona Regional

La distribució de la circulació de la xarxa del domini de modelització agregada per tipus de combustible es mostra en el gràfic de sectors següent.

Imatge 36: Distribució de la circulació viària al domini de modelització per energia de propulsió per a un total de 71,14 Mveh-km/any.



Font: Barcelona Regional

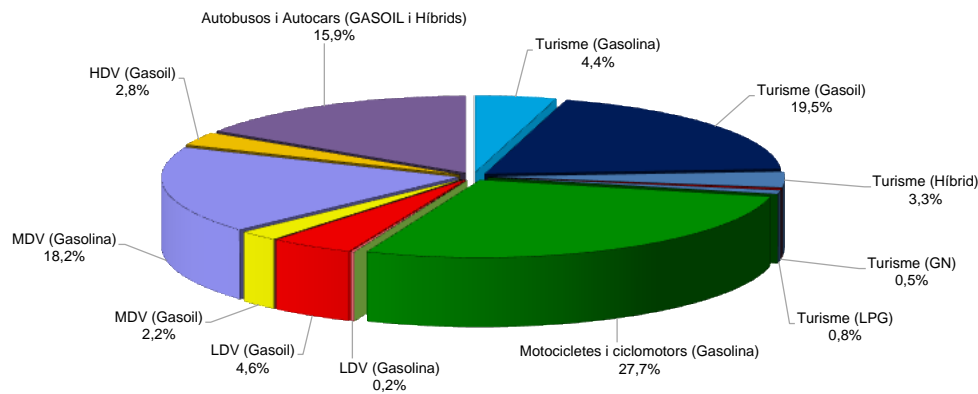
Com es pot observar a l'anterior gràfic de sectors, el gasoil representa el combustible clarament majoritari (64,5%), seguit de la gasolina (31,5%). L'electricitat és la tercera i

pràcticament última energia de propulsió en aquest escenari, degut en gran part a les motos i ciclomotors elèctrics.

### Emissions de NO<sub>x</sub> i PM<sub>10</sub>

A continuació es mostra un gràfic de sectors de les emissions de NO<sub>x</sub> de l'Escenari MIDxEV, distribuïdes per tipologia de vehicle i energia de propulsió.

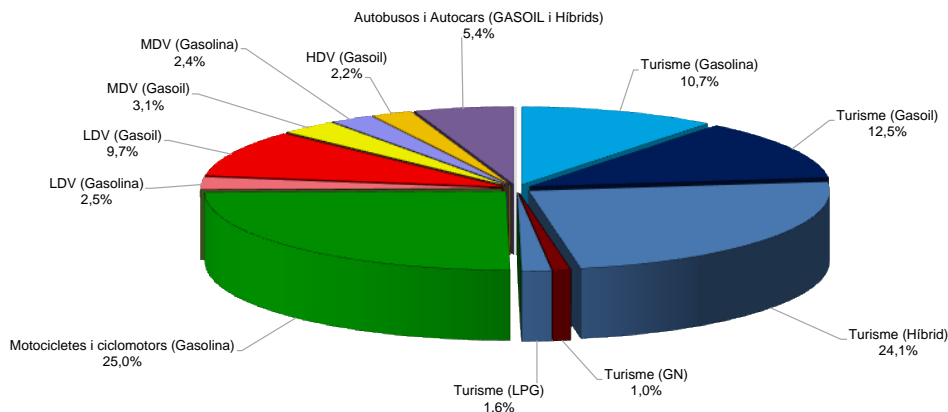
Imatge 37: Distribució de les emissions de NO<sub>x</sub> per tipus de vehicle al domini de modelització per a un total de 17,69 tn/any. Mitjana de 0,2486 g/km.



Font: Barcelona Regional

A continuació es mostra un gràfic de sectors de les emissions de PM<sub>10</sub> de l'Escenari MIDxEV, distribuïdes per tipologia de vehicle i energia de propulsió.

Imatge 38: Distribució de les emissions de PM<sub>10</sub> per tipus de vehicle al domini de modelització per a un total de 1,67 tn/any. Mitjana de 0,0234 g/km.



Font: Barcelona Regional

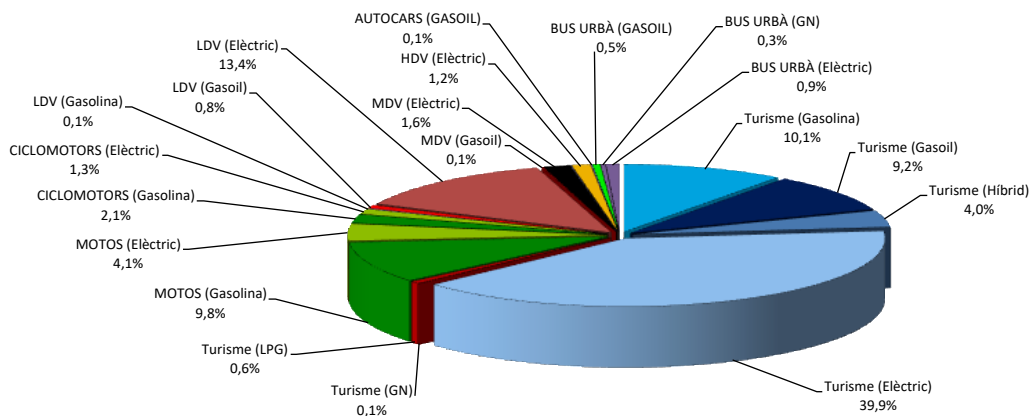
## Escenari Sense Etiqueta Grog

### Circulació viària

Aquest apartat recopila informació relacionada amb la circulació viària (veh-km/any) per al **Escenari Sense Etiqueta Grog**.

La distribució de la circulació del model de modelització per aquest escenari es mostra en el gràfic de sectors següent, agregat per tipus de vehicle.

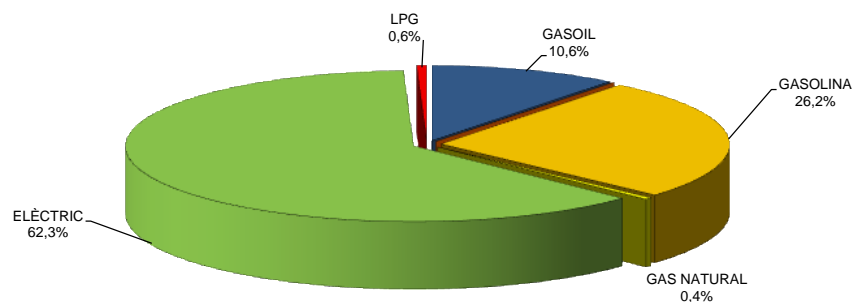
Imatge 39: Distribució de la circulació viària al domini de modelització per tipus de vehicle per a un total de 71,14 Mveh-km/any. Escenari Sense Etiqueta Grog.



Font: Barcelona Regional

La distribució de la circulació de la xarxa del domini de modelització agregada per tipus de combustible es mostra en el gràfic de sectors següent.

Imatge 40: Distribució de la circulació viària al domini de modelització per energia de propulsió per a un total de 71,14 Mveh-km/any. Escenari Sense Etiqueta Grog.



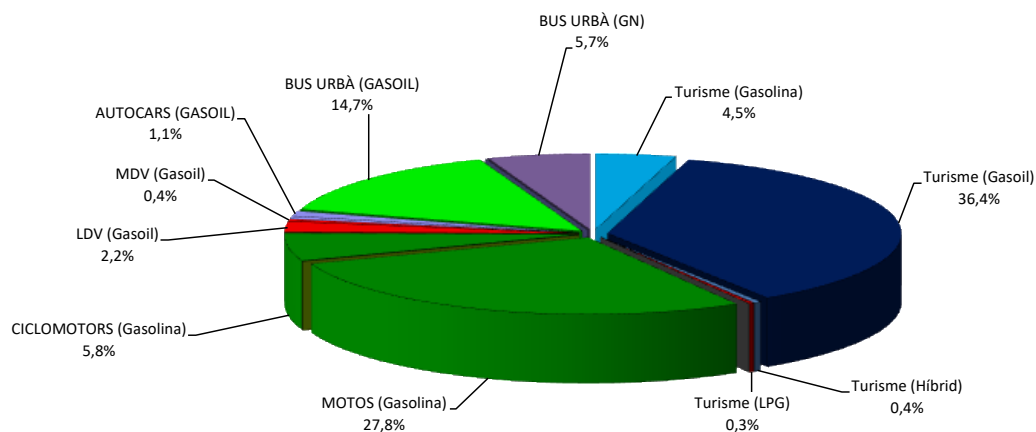
Font: Barcelona Regional

Com es pot observar a l'anterior gràfic de sectors, el gasoil representa el combustible clarament majoritari (64,5%), seguit de la gasolina (31,5%). L'electricitat és la tercera i pràcticament última energia de propulsió en aquest escenari, degut en gran part a les motos i ciclomotors elèctrics.

Emissions de NO<sub>x</sub> i PM<sub>10</sub>

A continuació es mostra un gràfic de sectors de les emissions de NO<sub>x</sub> de l'escenari Sense Grog, distribuïdes per tipologia de vehicle i energia de propulsió.

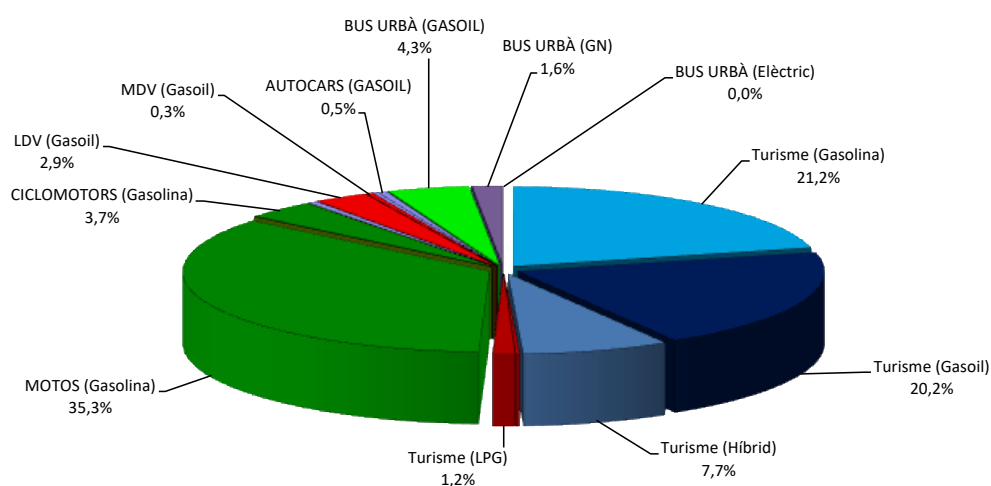
Imatge 41: Distribució de les emissions de NO<sub>x</sub> per tipus de vehicle al domini de modelització per a un total de 12,81 tn/any. Mitjana de 0,18 g/km. Escenari Sense Etiqueta Grog.



Font: Barcelona Regional

A continuació es mostra un gràfic de sectors de les emissions de PM<sub>10</sub> de l'escenari Sense Grog, distribuïdes per tipologia de vehicle i energia de propulsió.

Imatge 42: Distribució de les emissions de PM<sub>10</sub> per tipus de vehicle al domini de modelització per a un total de 0,83 tn/any. Mitjana de 0,0117 g/km. Escenari Sense Etiqueta Grog.



Font: Barcelona Regional

## Comparativa d'emissions dels tres escenaris

Un cop presentades les emissions dels tres escenaris, es mostra, pels tres escenaris, una taula (Taula 13) amb el percentatge electrificat del parc circulant, les emissions i les reduccions d'emissions respecte l'escenari Base. Es mostra també les emissions de PM<sub>2,5</sub>, no introduïdes al model però utilitzades pel càlcul d'impacte econòmic, presentat en capítols posteriors.

Taula 13. Comparació de les emissions de NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub> dels tres escenaris.

Escenari	% Parc elèctric	Emissions NO <sub>x</sub> (tn/any)	Emissions PM <sub>10</sub> (tn/any)	Emissions PM <sub>2,5</sub> (*) (tn/any)	Variació NO <sub>x</sub> respecte Base	Variació PM <sub>10</sub> respecte Base
Base	3,8%	76,31	3,44	2,68	0,0%	0,0%
MIDxEV	24,3%	17,69	1,67	0,96	-76,8%	-51,4%
SENSE ETIQUETA GROGA	62,3%	12,81	0,83	0,36	-83,2%	-75,7%

Font: Elaboració pròpia. (\*) Utilitzat a l'apartat d'impacte econòmic.

A primer cop d'ull, els resultats d'electrificació del parc i emissions pels escenaris MIDxEV i Sense Groga poden semblar no tenir massa lògica. Per això cal tenir en compte la informació descrita al Quadre 1.

En aquest sentit, la combinació de vehicles elèctrics i de combustió dels escenaris MIDxEV i Sense Groga provoca poca diferència en les emissions d'ambdós escenaris, tot i que Sense Groga tingui molts més vehicles elèctrics que MIDxEV. A l'apartat de resultats es discuteix l'efecte que té aquest fet en els valors d'immissió.

## Resultats de la modelització

Aquest apartat mostra els resultats en termes d'immissió per les diferents simulacions que s'han dut a terme.

### Mapes d'immissió mitjana anual

A continuació es mostren els mapes d'immissió mitjana anual de NO<sub>2</sub> i PM<sub>10</sub> a l'àmbit de modelització (nivell de carrer) per als diferents escenaris. A l'hora d'analitzar els mapes d'immissió mostrats a continuació, cal tenir en compte que els encreuaments registren la mobilitat de dos carrers alhora, amb l'augment d'emissions que això representa.



A continuació es mostra el mapa relatiu a la immissió mitjana anual de NO<sub>2</sub>.

Imatge 43: Mapa d'immissió mitjana anual de NO<sub>2</sub> (ug/m<sup>3</sup>) a nivell de carrer. Per ordre d'esquerra a dreta: Escenari Base, Escenari MIDxEV, i Escenari Sense Grogas..



Font: Barcelona Regional

A simple vista es pot constatar que l'electrificació del parc té uns efectes molt positius per a la qualitat de l'aire, ja que les emissions es redueixen dràsticament (percentatges d'electrificació a la Taula 13). S'observava a la mateixa taula (Taula 13) que les emissions entre els escenaris MIDxEV i Sense Grogas eren força semblants tot i la gran diferència en electrificació (**Quadre 1**). És per això que els nivells d'immissió no varien molt d'un escenari a un altre. Per tant, es destaca que renovar el parc circulant només a base de vehicles elèctrics no assegura una millora notable en la qualitat de l'aire. De fet, si no s'actua sobre els vehicles de combustió més contaminants, la contribució del vehicle elèctric pot ser molt discreta.



El carrer amb més immissió del domini és el carrer Aragó per a tots els escenaris, ja que és el que més mobilitat presenta (veure Imatge 29). Tot el tram de carrer analitzat presenta valors d'immissió mitjana del voltant de 80-100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (calçada) per a l'escenari Base. Tot i així, hi ha un gradient de concentracions desenvolupat des del centre dels carrers (Imatge 44).

S'observa un potent efecte barrera de la contaminació per part de les illes. La immissió a l'interior d'aquestes és molt inferior als valors registrats als encreuaments i trams de carrers, fins i tot a les regions més contaminades. Així doncs, els habitatges amb balcons ubicats al interior de les illes estan molt menys exposats que aquells que donen al carrer.

Imatge 44: Detall del carrer Aragó entre carrer Roger de Llúria i carrer Bruc. Mapa d'immissió mitjana anual de  $\text{NO}_2$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) a nivell de carrer. Ordenats d'esquerra a dreta: Escenari Base, MIDxEV i Sense Grogà..



Font: Barcelona Regional

Així doncs, els vianants que caminen per les voreres de l'anterior imatge respirarien uns nivells de  $\text{NO}_2$  d'entre 40-60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a l'escenari Base, 15-30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a l'Escenari MIDxEV, i 10-20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a l'escenari Sense Grogà (reduccions mitjanes del 56% i 71% respecte l'escenari Base). Les zones més perjudicades s'ubiquen a la calçada del carrer i sobretot als encreuaments, on la contaminació és generalment més alta que als trams de carrer. Un dels col·lectius més desfavorits són els motoristes, que s'exposen directament a aquests alts valors d'immissió.

A continuació es mostra el mapa relatiu a la immissió mitjana anual de  $PM_{10}$ .

Imatge 45: Mapa d'immissió mitjana anual de  $PM_{10}$  ( $\mu g/m^3$ ) a nivell de carrer. Per ordre d'esquerra a dreta: Escenari Base, Escenari MIDxEV, i Escenari Sense Grogas..

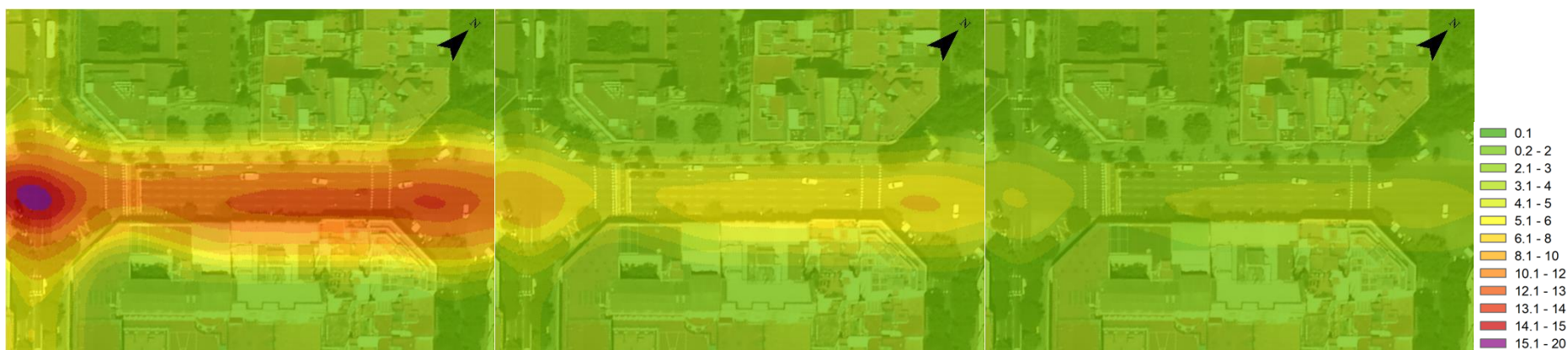


Font: Barcelona Regional

Com en el cas del  $NO_2$ , a primer cop d'ull es pot corroborar que l'electrificació del parc té uns efectes molt positius per a la qualitat de l'aire, ja que les emissions es redueixen dràsticament (percentatges d'electrificació a la Taula 13). S'observava a la mateixa taula (Taula 13) que les emissions entre els escenaris MIDxEV i Sense Grogas eren força semblants tot i la gran diferència en electrificació (tenir en compte la informació del **Quadre 1**). És per això que els nivells d'immissió no varien massa d'un escenari a un altre. Per tant, i tal i com succeïa amb el  $NO_2$ , renovar el parc circulant només introduint vehicles elèctrics no té perquè repercutir en una millora notable de la qualitat de l'aire. De fet, si no s'actua sobre els vehicles de combustió més contaminants, la contribució del vehicle elèctric pot ser molt discreta.

El carrer amb més immissió del domini torna a ser el carrer Aragó en el cas de les partícules i per a tots els escenaris, ja que és el que més mobilitat presenta (veure Imatge 29). Tot el tram de carrer analitzat presenta valors d'immissió mitjana del voltant de 12-15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (calçada) per a l'escenari Base. Tot i així, hi ha un gradient de concentracions desenvolupat des del centre de la calçada. Es mostra a la següent imatge. Per al cas de les partícules, també s'observa un efecte barrera de la contaminació per part de les illes, tot i que menys accentuat que en el cas del  $\text{NO}_2$ .

Imatge 46: Detall del carrer Aragó entre carrer Roger de Llúria i carrer Bruc. Mapa d'immissió mitjana anual de  $\text{PM}_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) a nivell de carrer. Ordenats d'esquerra a dreta: Escenari Base, MIDxEV i Sense Grogà.



Font: Barcelona Regional

Així doncs, els vianants que caminen per les voreres de l'anterior imatge respirarien uns nivells de  $\text{PM}_{10}$  d'entre 8-12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a l'escenari Base, 4-6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a l'Escenari MIDxEV, i 2-3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a l'escenari Sense Grogà (reduccions mitjanes del 50% i 75% respecte l'escenari Base). Les zones més perjudicades s'ubiquen a la calçada del carrer i sobretot als encreuaments, on la contaminació és generalment més alta que als trams de carrer. Un dels col·lectius més desfavorits són els motoristes, que s'exposen directament a aquests alts valors d'immissió.



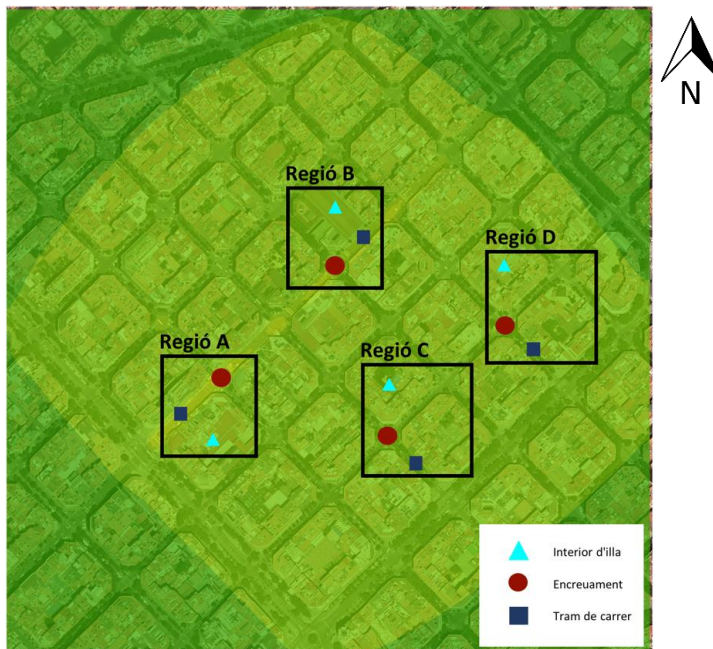
### Immissió a diversos punts del domini de modelització

S'ha analitzat com varia la concentració mitjana anual a quatre regions del domini (A, B, C, D). A la vegada, a cada regió s'ha mesurat la immissió mitjana anual de:

- Un encreuament
- Un tram de carrer
- L'interior d'una illa

La següent imatge mostra la ubicació de cadascuna de les regions de mesura del domini de modelització, amb la localització de l'encreuament, tram de carrer i interior d'illa per a cadascuna d'elles.

Imatge 47: Domini de modelització amb la ubicació de les diferents regions de mesura



Font: Barcelona Regional

La classificació d'aquestes regions s'ha fet en base a la mobilitat de cadascuna d'elles, ordenades de major a menor mobilitat (i per tant de més a menys emissions). La mobilitat a cadascuna de les regions i punts de mesura es mostren a la taula següent.

Taula 14. Mobilitat (vehicles/dia) a cadascuna de les regions del domini de modelització.

[Vehicles/dia]	Encreuament	Tram de carrer
Regió A	216.482	88.028
Regió B	170.744	77.666
Regió C	73.216	22.226
Regió D	44.453	8.265

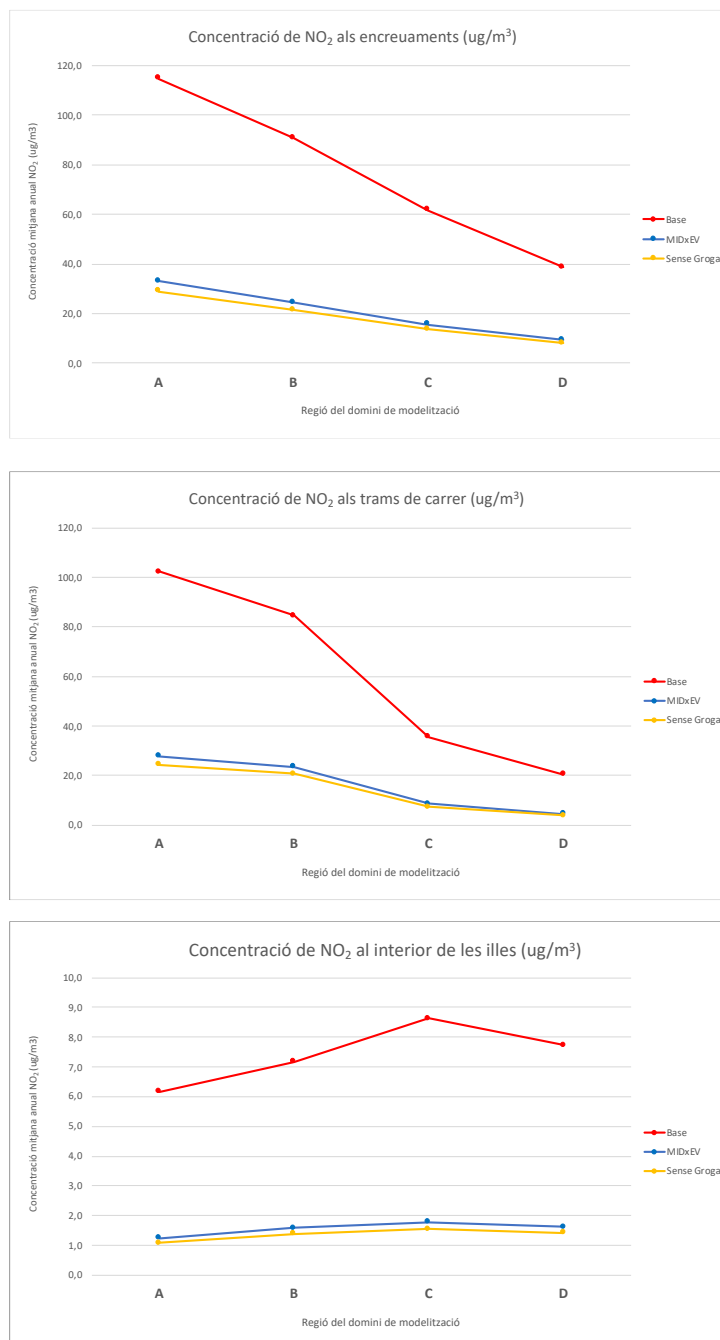
Font: Elaboració pròpia en base a dades del Graf de l'Ajuntament de Barcelona (2017).

## Anàlisi dels punts de cada regió

Per a cada regió, s'ha analitzat la concentració de cada punts per a cada escenari. A continuació es presenten els gràfics per NO<sub>2</sub>. Les taules amb tots els registres troben a l'Annex.

### NO<sub>2</sub>

Imatge 48: Concentracions mitjanes anuals de NO<sub>2</sub> als 4 punts de mesura d'encreuament, tram de carrer i interior de l'illa per els 3 escenaris d'estudi.



Font: Elaboració pròpia

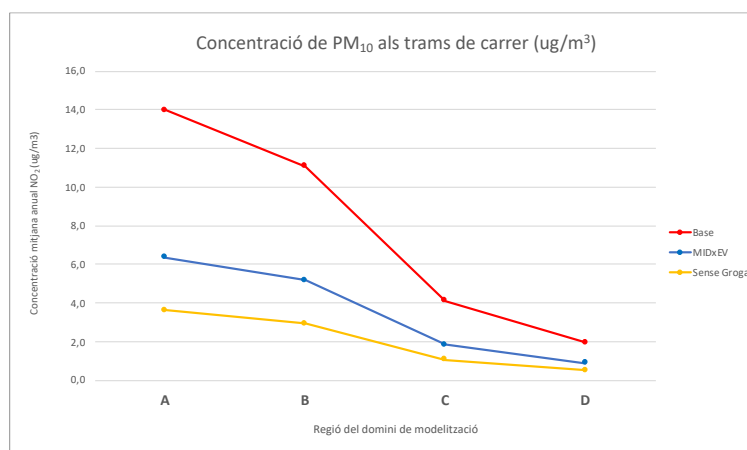
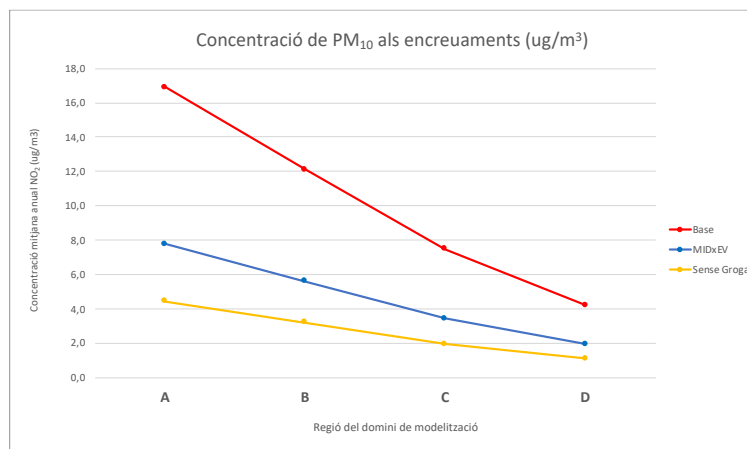
Com es pot observar als anteriors gràfics, la regió A es postula sempre com la més contaminada en tots els casos a excepció de l'interior de les illes, on la regió C presenta més concentració. La disminució de la concentració sempre és més acusada a l'escenari Base, ja que és l'escenari amb més emissions a dispersar.

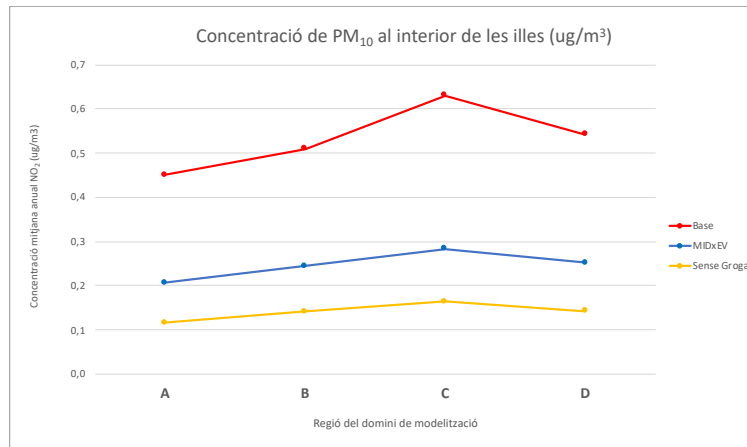
Cal destacar l'efecte barrera que provoquen les illes al  $\text{NO}_2$ , aconseguint valors fins a 18 vegades menors que als encreuaments en el cas de la regió A (es passa de  $114,65 \text{ ug}/\text{m}^3$  a  $6,16 \text{ ug}/\text{m}^3$ ). Així doncs, la concentració és màxima als encreuaments (hi ha doble mobilitat) i decau als trams de carrer (tots els carrers del domini són unidireccionals) per arribar al mínim al interior de les illes.

A continuació es mostren les taules relatives a partícules  $\text{PM}_{10}$ .

## $\text{PM}_{10}$

Imatge 49: Concentracions mitjanes anuals de  $\text{NO}_2$  als 4 punts de mesura d'encreuament, tram de carrer i interior de l'illa per els 3 escenaris d'estudi.





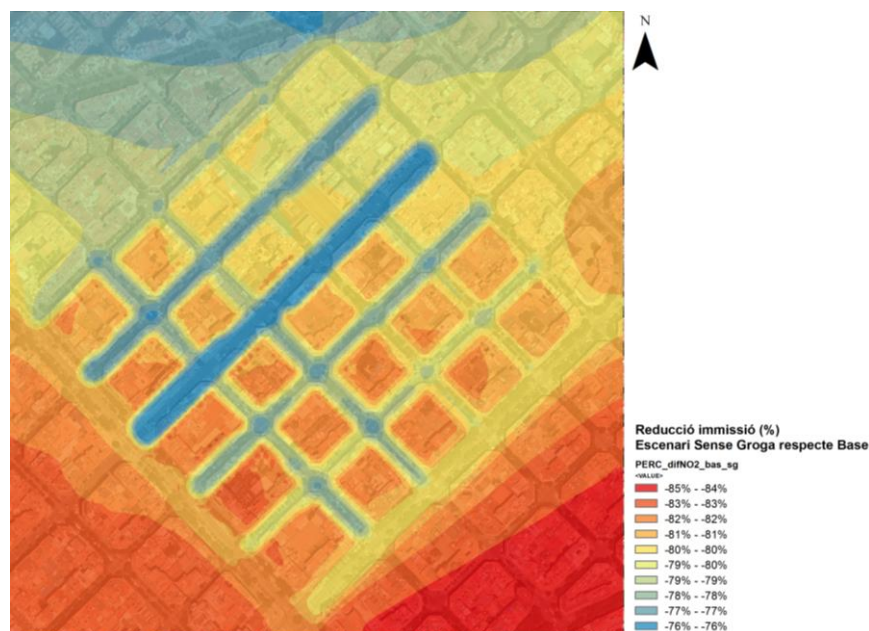
Font: Elaboració pròpia

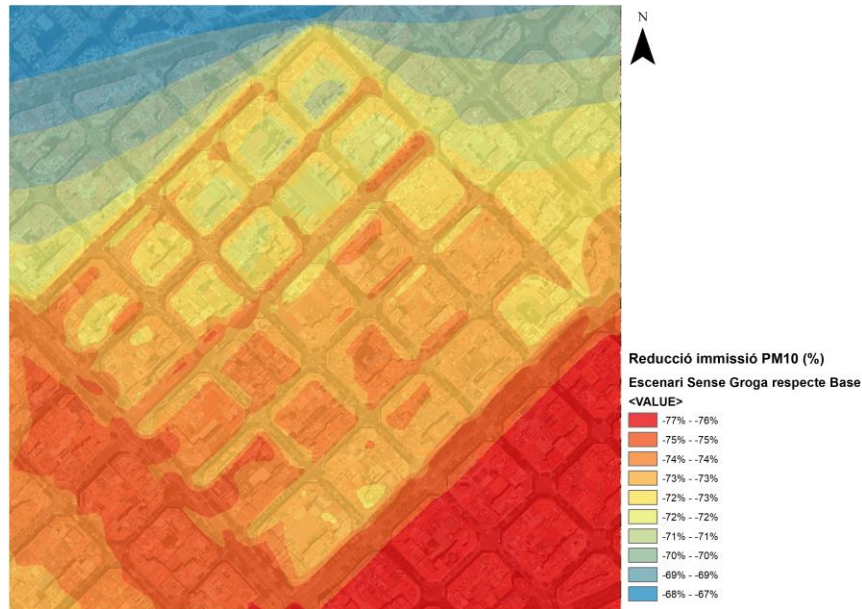
Com en el cas del NO<sub>2</sub>, la regió A és la més contaminada en tots els escenaris, especialment en el Base ja que és on hi ha més emissions a dispersar. La concentració de partícules disminueix als trams de carrer. Destacar l'efecte barrera de les illes, com en el cas del NO<sub>2</sub>.

### Reducció dels valors d'immissió entre els escenaris extrems (Base i Sense Grogas)

S'ha calculat la diferència d'immissió en % per a NO<sub>2</sub> i PM<sub>10</sub> per als escenaris extrems (Base i Sense Grogas). Es mostren a la imatge següent:

Imatge 50: Percentatge (%) de reducció dels valors d'immissió de NO<sub>2</sub> (a dalt) i PM<sub>10</sub> (a baix) entre l'escenari Base i l'escenari Sense Grogas.





Font: Elaboració pròpia

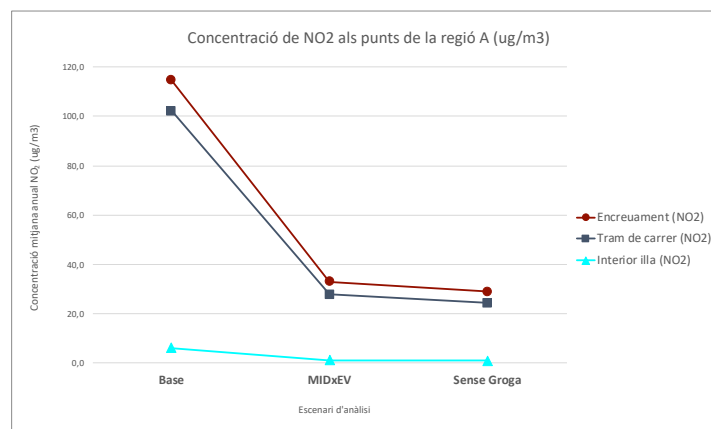
Com es pot observar a la imatge anterior, les reduccions en immissió entre els dos escenaris són força importants tant en NO<sub>2</sub> com en PM<sub>10</sub>. Tot i així, les vies amb més trànsit són les que perceben menys reducció especialment en el cas del NO<sub>2</sub>. La reducció de les partícules és menor que el NO<sub>2</sub> en percentatge (oscil·lant entre el -67%-77%). En el cas del NO<sub>2</sub> la reducció és d'entre el -86% i -76%. Per tant, la immissió NO<sub>2</sub> té més tendència a disminuir que la de PM<sub>10</sub> quan les emissions globals es redueixen.

### Anàlisi específic de la regió amb més impacte (regió A).

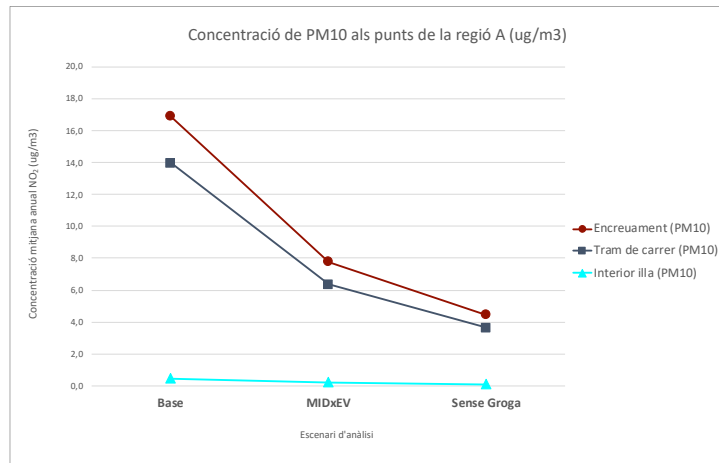
Es mostren els valors específics de NO<sub>2</sub> i PM<sub>10</sub> de la regió més desfavorida pels vianants en els tres escenaris d'estudi: la regió A.

Les dues taules següents mostren els nivells d'immissió mitjans anuals a la intersecció, tram de carrer i interior d'illa de la regió A.

Imatge 51: Concentracions mitjanes anuals de NO<sub>2</sub> als 4 punts de mesura d'encreuament, tram de carrer i interior de l'illa per els 3 escenaris d'estudi.







Font: Elaboració pròpia

Es corrobora que l'encreuament és generalment el punt més contaminat de la regió A. S'observa que les partícules són més sensibles que el NO<sub>2</sub> al canvi d'escenari de MIDxEV a Sense Grogà.

L'interior de les illes es mantenen al marge de la situació exterior a elles sigui quin sigui l'escenari, propiciant un efecte barrera que afavoreix la qualitat de l'aire a la regió dins de les illes.

La següent taula mostra les reduccions de NO<sub>2</sub> i PM<sub>10</sub> a la Regió A per als dos escenaris extrem (Base i Sense Grogà).

Taula 15. Concentració (ug/m<sup>3</sup>) i reducció (%) de NO<sub>2</sub> i PM<sub>10</sub> a la regió A (Base vs Sense Grogà).

Concentració NO <sub>2</sub> regió A (ug/m <sup>3</sup> )	Encreuament	Tram de carrer	Interior illa
Escenari Base (Regió A)	114,65	102,23	6,16
Escenari Sense Grogà (Regió A)	28,94	24,34	1,08
Reducció Sense Grogà respecte Base (%)	<b>-74,8%</b>	<b>-76,2%</b>	<b>-82,5%</b>
Concentració PM <sub>10</sub> regió A (ug/m <sup>3</sup> )	Encreuament	Tram de carrer	Interior illa
Escenari Base (Regió A)	16,90	13,97	0,45
Escenari Sense Grogà (Regió A)	4,44	3,63	0,12
Reducció Sense Grogà respecte Base (%)	<b>-73,7%</b>	<b>-74,0%</b>	<b>-74,2%</b>

Font: Elaboració pròpia.

Com es pot observar a l'anterior taula, les reduccions entre els dos escenaris als tres punts de la regió A són molt importants. Això demostra que la reducció en emissions (configuració del parc circulant) és la principal causa de la reducció dels valors d'immissió, tot i que cal recordar que hi ha altres factors que també hi contribueixen com són la configuració del canyó urbà i la meteorologia.

### Temps de simulació

S'han dut a terme un total de **3** simulacions (una per a cada escenari). S'han executat en paral·lel.

Totes les simulacions han suposat en total de **303,4** hores de càlcul de CPU repartides entre tres màquines de vuit processadors cadascuna. El temps de simulació desglossat per escenari analitzat es presenta a la següent taula

Taula 16. Temps de computació per al càlcul de cada escenari.

Escenari	Temps de simulació (h)	% del temps global de simulació
Base	102,12	33,7%
MIDxEV	98,01	32,3%
Sense Etiqueta Grogas	102,92	34,0%
<b>TOTAL</b>	<b>303,04</b>	<b>100,0%</b>

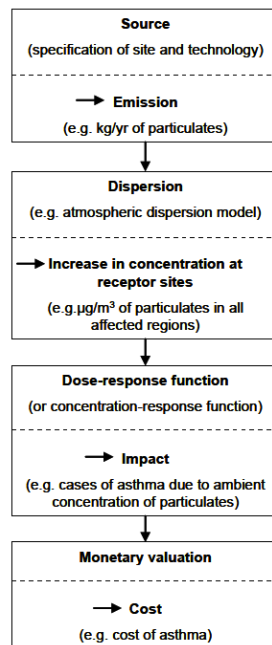
Font: Elaboració pròpia.

Per tant, al realitzar les simulacions en paral·lel, els tres escenaris van estar llestos en **102,92 h**, una reducció en temps de càlcul del **66%** respecte si s'haguessin calculat de forma consecutiva.

## Impacte econòmic de la contaminació atmosfèrica al domini de modelització

La contaminació atmosfèrica genera impacte econòmic, tal i com ja s'ha comentat a l'apartat de problemàtica d'aquest treball. Totes els sectors d'emissió contribueixen a aquest impacte econòmic, però el transport (com a un dels sectors més contaminants) és dels sectors que causa més impacte a l'economia. A la vegada, les emissions dels vehicles dièsel són les que creen més impacte. No tots els ciutadans europeus estan exposats als mateixos nivells de contaminació de vehicles dièsel. Les zones urbanes acusen molta més contaminació que les zones rurals. En el cas d'Espanya, el **80%** dels costos de la contaminació creada pel transport al 2016 provenien de les emissions dels vehicles dièsel [43]. De fet, els costos associats a la contaminació assumits per aquest treball han seguit el flux de treball indicat a la següent imatge, basat en [43]:

Imatge 52. Metodologia utilitzada en els costos associats a la contaminació de l'aire assumits en aquest treball.



Font: [43]

Així doncs, per calcular els costos associats a la contaminació de l'aire a qualsevol nivell:

- S'ha de partir de les fonts emissives al nivell escollit i quantificar-ne les seves emissions (en aquest cas les emissions del transport).
- Se'n calcula la dispersió (amb un model com l'utilitzat en aquest treball, per exemple) a diversos punts d'interès.
- Per mitjà d'una eina específica es quantifica l'impacte al nivell considerat (per exemple els casos d'infart resultats de les emissions dels vehicles) a un punt d'interès. En aquest sentit, la font consultada utilitza un model anomenat *EcoSense*, un model que estima la relació entre les emissions i el seu eventual impacte [44].
- Es tradueix l'impacte a aquest nivell a unitat monetària (€/kg de contaminant emès).

Tenint en compte la metodologia exposada, la Taula 17 mostra l'aportació de cada tipologia de vehicle als costos derivats de la contaminació del trànsit a Espanya (2016)..

Taula 17. Costos derivats de la contaminació provinent del transport a Espanya l'any 2016.

Costos l'any 2016 (M€)	Turismes		Autobús	Autocar	Motocicleta	Furgoneta		Camió	Total	
	Gasolina	Dièsel	Dièsel	Dièsel	Gasolina	Gasolina	Dièsel	Dièsel	Gasolina	Dièsel
Espanya (combustible)	686	2084	29	132	279	18	714	895	983	3854
Espanya (Total)	2770		29	132	279	732		895	4837	
% Respecte Total	14%	43%	1%	3%	6%	0%	15%	19%	20%	80%
% Respecte tipologia vehicle	25%	75%	18%	82%	100%	2%	98%	100%	20%	80%

Font: Elaboració pròpia en base a informació explícita extreta de [43]. NOTA: Aquesta informació no s'ha calculat en aquest treball, simplement s'ha transcrit de [43].

Com es pot observar, els costos derivats de la contaminació dels vehicles de combustió van ascendir fins als **4.837 M€** (la gran majoria provocada pels vehicles dièsel) l'any 2016 a Espanya. Segons [43], un 93% d'aquests costos són relacionats amb la salut de les persones. La següent taula mostra el cost per càpita de la contaminació dels vehicles a Espanya en base a [45]. També s'inclou la part del cost que assumiria Barcelona en base a la seva població [46].

Taula 18. Costos de la contaminació del trànsit a Espanya i a Barcelona l'any 2016.

	Població 2016 (habitants)	Costos contaminació transport (M€)	Cost per càpita (€/habitant)
Espanya	46.440.099	4.837	104,16
Barcelona	1.610.427	167,73	
Costos sanitaris (M€)			
Espanya	46.440.099	4.498	96,86
Barcelona	1.610.427	156	

Font: Elaboració pròpia en base a [43], [45] i [46].

Per tant, la contaminació dels vehicles va costar l'any 2016 104,16€ a cada ciutadà espanyol (96,86€ destinats a reparar danys a la salut de les persones).

En aquest sentit, aquest capítol avalua l'impacte econòmic que generen **exclusivament** les emissions del sector viari de cada escenari, ja que només s'han tingut en compte al model les emissions del trànsit circumscrites al domini de la modelització (NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub>). No s'han tingut en comptes les emissions indirectes del vehicle elèctric (emissions provinents de la generació elèctrica per propulsar el vehicle, etc...). És a dir, s'ha considerat que les emissions dels vehicles elèctrics són nul·les.

Els costos més importants derivats de les emissions contaminants del trànsit tenen a veure amb [47]:

- **La salut de les persones:** representen entre el 90-100% dels costos de la contaminació del transport [43]. Costos dels tractaments mèdics pertinents, d'admissió a hospital, cirurgies... També inclou indirectament part dels costos laborals, ja que els treballadors no poden treballar en plenes facultats degut als problemes que la contaminació ocasiona a la seva salut. I és que els contaminants provinents dels vehicles que respirem les persones incrementen el risc de patir malalties cardiovasculars i respiratòries. Els principals causants d'aquestes patologies són les partícules (PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub>) emeses pels vehicles dièsel. L'impacte creat també depèn del temps d'exposició a la contaminació. [43].
- **Deteriorament de materials i edificacions:** aquests es poden malmetre amb l'acumulació de contaminants a la superfície de l'edifici, processos corrosius que deteriorenen les façanes, etc...
- **Pèrdues en els cultius:** Les substàncies acidificants i l'ozó troposfèric causen danys als conreus i redueixen la capacitat de producció dels mateixos.
- **Impacte a la biodiversitat i als ecosistemes:** els contaminants produeixen acidificació i eutrofització als ecosistemes, creant un impacte negatiu a la biodiversitat d'aquests.

S'han utilitzat els factors presentats a la següent taula per al càlcul de l'impacte econòmic del cas d'estudi: costos totals i relatius a la salut. Aquests últims s'han tingut en compte específicament per la seva rellevància en l'impacte global. Al no disposar de dades específiques per Barcelona, s'han utilitzat els costos (en €/kg de contaminant emès) per a Espanya el 2016 presents a [43] i basats en la metodologia exposada al principi d'aquest capítol.

Taula 19. Costos per kg de contaminant emès pel trànsit (€/kg): TOTALS i només relatius a la salut.

Contaminant emès	Costos totals (€/kg) (*)	Costos relatius a la salut (€/kg) (**)
NO <sub>x</sub>	4,9	4,2
PM <sub>10</sub>	11,9	11,6
PM <sub>2,5</sub>	348	348

Font: elaboració pròpia en base a [43]. (\*): Inclouen els costos de salut, edificacions, cultius, biodiversitat i ecosistemes. (\*\*): Només inclou costos atribuïbles a la salut de les persones.

Així doncs, coneixent les emissions per a cada contaminant i escenari (Taula 13) i utilitzant els factors de la Taula 19 es calculen els costos derivats de la contaminació del trànsit per a cada escenari. Es mostren a la taula següent:

Taula 20. Costos totals i relacionats amb la salut relatius a les emissions de NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub> per als tres escenaris. També inclou la reducció de costos.

Contaminant/Escenari	Base	MIDxEV	Sense Grogà	MIDxEV	Sense Grogà
Emissions (tn/any)				Reducció d'emissions respecte escenari Base (tn/any)	
NO <sub>x</sub>	76,31	17,69	12,81	58,62	63,5
PM <sub>10</sub>	3,44	1,67	0,83	1,77	2,61
PM <sub>2,5</sub>	2,68	0,96	0,36	1,72	2,32
Costos (€/any)				Reducció de costos respecte escenari Base (€/any)	
TOTALS	1.347.495 €	440.634 €	197.926 €	906.861 €	1.149.569 €
NO <sub>x</sub>	373.919 €	86.681 €	62.769 €	287.238 €	311.150 €
PM <sub>10</sub>	40.936 €	19.873 €	9.877 €	21.063 €	31.059 €
PM <sub>2,5</sub>	932.640 €	334.080 €	125.280 €	598.560 €	807.360 €
dels quals relacionats amb la salut (€/any)	1.293.046 €	427.750 €	188.710 €	865.296 €	1.104.336 €
NO <sub>x</sub>	320.502 €	74.298 €	53.802 €	246.204 €	266.700 €
PM <sub>10</sub>	39.904 €	19.372 €	9.628 €	20.532 €	30.276 €
PM <sub>2,5</sub>	932.640 €	334.080 €	125.280 €	598.560 €	807.360 €
% Costos totals	100%	100%	100%	-67,3%	-85,3%
NO <sub>x</sub>	27,7%	19,7%	31,7%	-76,8%	-83,2%
PM <sub>10</sub>	3,0%	4,5%	5,0%	-51,5%	-75,9%
PM <sub>2,5</sub>	69,2%	75,8%	63,3%	-64,2%	-86,6%
% dels quals relacionats amb la salut	100%	100%	100%	-66,9%	-85,4%
NO <sub>x</sub>	24,8%	17,4%	28,5%	-76,8%	-83,2%
PM <sub>10</sub>	3,1%	4,5%	5,1%	-51,5%	-75,9%
PM <sub>2,5</sub>	72,1%	78,1%	66,4%	-64,2%	-86,6%

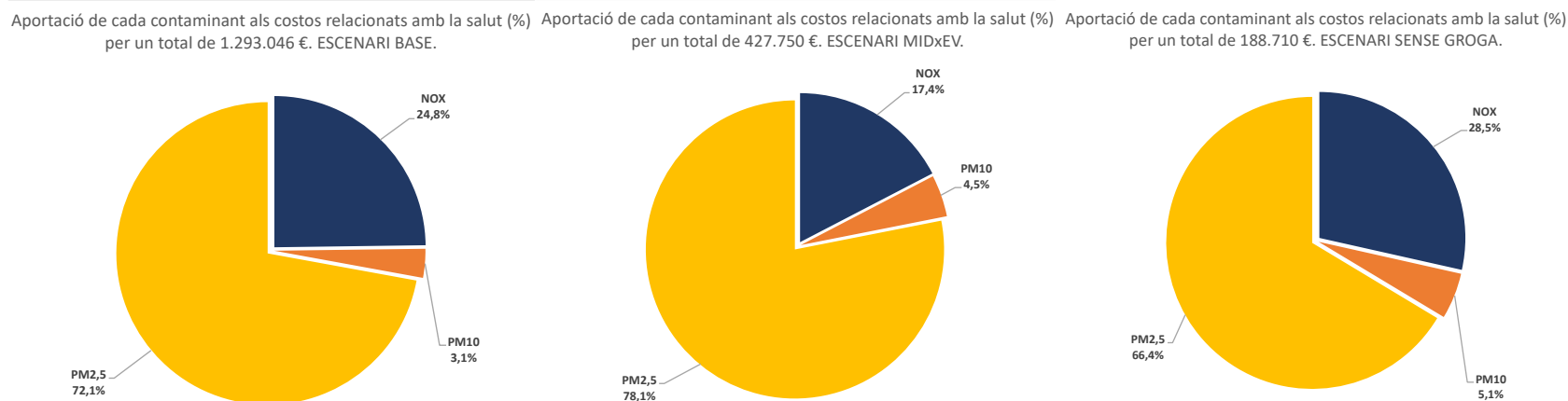
Font: Elaboració pròpia en base a [43] i base de dades COPERT.

Així doncs, l'impacte econòmic de cada escenari al domini de modelització és:

- L'impacte econòmic global generat per l'**escenari Base** és de **1.347.495 €** (dels quals **1.293.046 €** relacionats amb impacte a la salut de les persones).
- L'impacte econòmic global generat per l'**escenari MIDxEV** és de **440.634 €** (dels quals **427.750 €** relacionats amb impacte a la salut de les persones). L'estalvi total respecte l'escenari Base és de **906.861 €**, dels quals **865.296 €** s'estalvien en termes de salut.
- L'impacte econòmic global generat per l'**escenari Sense Grogà** és de **197.926 €** (dels quals **188.710 €** relacionats amb impacte a la salut de les persones). L'estalvi total respecte l'escenari Base és de **1.149.569 €**, dels quals **1.104.336 €** s'estalvien en termes de salut.

Els següents gràfics mostren la distribució dels **costos relacionats amb la salut** (per la seva especial rellevància) per a cadascun dels escenaris.

Imatge 53: Concentracions mitjanes anuals de NO<sub>2</sub> als 4 punts de mesura d'encreuament (ug/m<sup>3</sup>), tram de carrer i interior de l'illa per els 3 escenaris d'estudi.



Font: Elaboració pròpia

Com es pot observar als gràfics anteriors, les PM<sub>2,5</sub> són les grans causants dels costos de la contaminació relatius a la salut de les persones, ja que és el contaminant que més la malmet. El segueixen el grup dels òxids de nitrogen (NO<sub>x</sub>) i les partícules PM<sub>10</sub>. Per tant, reduir les emissions de PM<sub>2,5</sub> reduiria de forma molt important els costos que afecten a la salut.

Tenint en compte que la superfície de domini de modelització és de **1.144.900 m<sup>2</sup>** o **114,49 ha** es calculen els costos per m<sup>2</sup> de superfície urbana. Es mostren a la següent taula:

Taula 21. Costos per unitat de superfície relatius a la salut provocada per la contaminació al domini de modelització.

	Base	MIDxEV	Sense Grogas	Reducció costos respecte escenari Base	
				MIDxEV	Sense Grogas
Costos (€/m <sup>2</sup> )	1,13 €	0,37 €	0,16 €	-66,9%	-85,4%
Costos (€/ha)	11.294 €	3.736 €	1.648 €		

Font: Elaboració pròpia.

Tenint en compte el preu mitjà de venda d'habitatge de segona mà a Barcelona el 2017 pres de [48]:

- Amb els costos totals generats a l'escenari Base es podria comprar un pis de **300 m<sup>2</sup>** a Barcelona.
- Amb els costos totals generats a l'escenari MIDxEV es podria comprar un pis de **100 m<sup>2</sup>** a Barcelona.
- Amb els costos totals generats a l'escenari Sense Grogas es podria comprar un pis de **40 m<sup>2</sup>** a Barcelona.

Per tant, observant els costos des del punt de vista de possibilitats de compra d'un habitatge a Barcelona, es nota que aquest prenen certa envergadura.



## Conclusions

La contaminació atmosfèrica s'ha transformat en un dels factors de risc més importants per a la salut de les persones i el sector viari és un dels seus principals responsables. Aquest treball ha dut a terme una modelització de la qualitat de l'aire a una regió rectangular específica de l'Eixample de Barcelona. En aquest sentit, s'ha utilitzat el model de dispersió **ADMS-Urban** per calcular els valors d'immissió de **NO<sub>2</sub>** i **PM<sub>10</sub>** al domini de modelització. Per assolir-ho s'han utilitzat, a més dels inputs estructurals necessaris pel model, les dades reals del parc circulant de l'any 2017 a Barcelona. Per observar l'impacte de la naturalesa del parc circulant en les immissions a la regió d'estudi, aquest parc s'ha sotmès a diversos canvis, resultant en dos escenaris més basats en l'electrificació global (tenint en compte la informació del Quadre 1). De fet, els dos escenaris addicionals analitzats (**MIDxEV** i **Sense Grogà**) es presenten com una **evolució més ambiciosa** en termes d'electrificació que l'escenari plantejat per l'Ajuntament de Barcelona i que tindrà lloc a la ciutat a partir del gener del 2020. Aquest treball pot ser analitzat pel consistori com a orientació de cara a la presa de decisions al llarg de la properes dècades sobre el parc circulant de la ciutat.

Les conclusions d'aquest estudi en relació a l'impacte del vehicle elèctric a la qualitat de l'aire i el seu potencial de reducció d'emissions al parc circulant són:

- Les emissions són el factor més determinant per als valors d'immissió final, així que la millora de la qualitat de l'aire va fortament lligada a una **reducció de les emissions**, que pot venir donada **en part pel vehicle elèctric**.
- Aquesta reducció d'emissions es pot assolir **electrificant** el parc circulant (tenint en compte la informació del Quadre 1). Cal tenir especial cura amb els vehicles de combustió que queden al parc, doncs segons quina sigui la seva distribució (tecnologia EURO, aquesta pot influir molt en els valors d'immissió final, independentment del valor d'electrificació. Així doncs, els vehicles de combustió de l'escenari MIDxEV són més nets comparativament que els de l'escenari Sense Grogà, tot i que aquest últim té un grau d'electrificació molt més elevat del parc circulant que el MIDxEV (24,3% i 62,3% respectivament).
- Amb línia amb el punt anterior, els vehicles de combustió d'última generació han d'assumir actualment part de la reducció de les emissions que els vehicles elèctrics encara no poden cobrir. Si bé la presència del VE no serà **hegemònica** a curt ni a mitjà termini, actualment cal centrar part dels esforços en renovar la flota dels vehicles de combustió més vells. Aquelles persones que no puguin adquirir encara un vehicle elèctric han de tenir facilitats per adquirir un vehicle de combustió d'última generació (EURO 6), reduint així significativament les emissions respecte l'anterior vehicle vell.

La presència del vehicle elèctric a la modelització de la regió estudiada ha resultat en els valors d'immissió per als tres escenaris analitzats. D'aquests resultats se'n desprèn que:

- Aquells carrers amb **més mobilitat** i en escenaris amb **menys electrificació** del parc circulant presenten uns **valors d'immissió més elevats**.
- Els **encreuaments** són les zones amb **valors d'immissió més alts**, seguit dels **trams de carrer** i finalment l'**interior de les illes**. De fet, s'ha observat que les **illes** creen un **efecte barrera molt efectiu** contra la contaminació. No són tant sensibles als canvis en emissions (electrificant el parc, per exemple) com els encreuaments i els trams de carrer. És per això que aquestes regions aïllades de contaminació

podrien utilitzar-se en gran mesura com a espais de lleure especialment per els col·lectius vulnerables a la pol·lució (ancians, nens, persones malaltes...).

- Les **emissions** s'han aconseguit **reduir** a l'escenari **Sense Grog** un **83,2% en NO<sub>x</sub>** i un **75,7% en PM<sub>10</sub>** respecte l'escenari Base. Traduït en immissions a la regió A (la més contaminada del domini), l'escenari redueix la immissió un 73,7% al seu encreuament, un 74% al tram de carrer un 74%,2 a l'interior d'illa.
- L'aire que respiren **els vianants** que caminen per les voreres està menys contaminat que l'aire del tram central de la calçada, a causa d'un gradient de concentracions que els afavoreix. Tot i així, aquests **estan exposats a valors que sovint superen els establerts per la UE a l'escenari Base, tant per a NO<sub>2</sub> com per a PM<sub>10</sub>** (40 ug/m<sup>3</sup> de mitjana anual per ambdós contaminants).

Les conclusions d'aquest estudi en relació a l'impacte econòmic de la contaminació i a la seva potencial reducció a partir dels resultats obtinguts amb la modelització dels diferent escenaris són:

- A l'escenari Base, la contaminació a la regió ha generat uns costos totals associats de **1.347.495€/any**, dels quals **1.293.046€/any** (un 96%) estan relacionats únicament amb els problemes que els contaminants generen a la salut. L'escenari **MIDxEV** redueix els costos totals en un **67,3%** i els costos relatius a la salut en un **66,9%**. Pel que fa a l'escenari **sense Grog**, les **reduccions** són del **85,3%** i del **85,4%** respectivament. El principal causant dels costos relacionats amb la salut són les PM<sub>2,5</sub> (amb un 72% de contribució mitjana aproximada), seguit dels NO<sub>x</sub> (amb 23% de contribució mitjana aproximada) i les PM<sub>10</sub> (5% de contribució mitjana aproximada).
- De fet, amb els costos totals generats a l'escenari Base es podria comprar un pis de **300 m<sup>2</sup>** a Barcelona (2017). Pel que fa a l'escenari MIDxEV es podria comprar un pis de **100 m<sup>2</sup>** a la ciutat (2017). Per últim, amb els costos totals generats a l'escenari Sense Grog es podria comprar un pis de **40 m<sup>2</sup>** a Barcelona.

Per tant, **l'electrificació del parc resulta en una reducció important de les emissions a nivell local**, fet que redueix els nivells d'immissió finals en favor a la qualitat de l'aire a la regió modelitzada i analitzada.

## Agraïments

Al meu tutor de la universitat, César Valderrama, per orientar-me durant tot el procés d'aquest treball.

Al meu tutor de Barcelona Regional, Jose Lao, per inculcar-me la seva manera d'enfocar els problemes i orientar-me a l'hora de fer el treball.

A en Gustavo Arévalo (Barcelona Regional), per haver-me ensenyat tot allò que sé en relació al model de dispersió i orientar-me a l'hora de fer el treball.

A Barcelona Regional, per facilitar-me les seves instal·lacions i software necessari a l'hora de fer el treball.

A l'Ajuntament de Barcelona, per cedir-me les dades relatives al graf de mobilitat de Barcelona 2017.

A l'Àrea Metropolitana de Barcelona i Ajuntament de Barcelona, per cedir-me les dades relatives a l'estudi del RSD [38].

A tot l'equip de GIS de Barcelona Regional, per ajudar-me en tots els temes del treball relacionats amb GIS.

A tots aquells que han fet possible aquest treball.

## Referències

- [1] European Environmental Agency (EEA) 2018 *Air quality in Europe — 2018*
- [2] UN Environment; Anne Olhoff *Towards a Pollution Free Planet*
- [3] van der Slot A, Schlick T, Pfeiffer W and Baum M 2016 Integrated Fuels and Vehicles Roadmap to 2030+ *Rol. Berger GmbH*. 1–138
- [4] Anenberg S, Miller J, Henze D and Minjares R 2019 *A global snapshot of the air pollution-related health impacts of transportation sector emissions in 2010 and 2015*
- [5] Air Quality Report 2018 World Air Quality Index
- [6] World Health Organization Air Pollution , Climate and Health
- [7] Balmes J R 2019 Household air pollution from domestic combustion of solid fuels and health *J. Allergy Clin. Immunol.* **143** 1988
- [8] Ceballos M Á, Segura P, Aragón M, Gutiérrez E, Senán J, Ramos P, Reaño M, Clemente R, Orihuel M, García B, García M, Cerrillo L, Veiras X, Bárcena J, Belmonte P, Luego P, Navascúes E, Marcos R and Hernández K 2018 La contaminación por ozono en el Estado español durante 2018 86
- [9] Oyanguren H, Prieto L and Ferrada L 1970 Contaminación atmosférica. *Rev. Med. Chil.* **98** 34–41
- [10] Consorci Sanitari de Barcelona 2013 Informe d'avaluació de la qualitat de l'aire a la ciutat de Barcelona 2017 *Agència Salut Pública*
- [11] Penuelas J, Llusia J and Applications F 2003 Investigación
- [12] UNEP Environment 2017 *The Emissions Gap Report 2017 - A UN Environment Synthesis Report* vol 349
- [13] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático 2015 Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático *Cop21* **21930** 18
- [14] OECD 2003 The economic consequences of air pollution *Environ. Pollut.* **15** 313
- [15] European Environmental Agency 2018 *European Union emission inventory report 1990-2016*
- [16] European Parliament 2019 Electric road vehicles in the European Union Trends , impacts and policies
- [17] Comité A L, Social E Y, Al E Y, Comité A L, Social E Y and Al E Y 2013 COM(2013) 918 final *Com. Eur.*
- [18] Comisión Europea 2008 Directiva 2008/50/CE *D. Of. la Unión Eur.* 1–44
- [19] Ministerio de Agricultura y Pesca A y M A G de E 2017 Plan Nacional de Calidad del AIRE 2017-2019 ( Plan Aire II ) **2019** 0–125
- [20] World Health Organization 2005 WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide *World Heal. Organ. WHO/SDE/PH* 5–18
- [21] Catalunya G de La qualitat de l'aire a Catalunya
- [22] Union E Transport Policy
- [23] Kouridis C, Samaras C, Hassel D, Mellios G, Mccrae I, Hickman J, Zierock H, Keller M, Rexeis M, Andre M, Winther M, Pastramas N, Boulter P, Katsis P, Joumard R, Rijkeboer R and Geivanidis S 2018 EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 1–143
- [24] BOE 2016 Spanish Government. Ministry of the Interior. Official State Gazette

- Num 96, Sec. I. Page 26896 60502–11
- [25] Agency I E 2018 Global EV Outlook 2018 *Glob. EV Outlook 2018*
  - [26] IEA 2017 Global EV Outlook 2017 Together Secure Sustainable Global EV outlook 2017 *Int. Energy Agency*,
  - [27] REE 2017 Informe REE 2017
  - [28] European Environment Agency 2016 *Electric Vehicles in Europe. European Environmental Agency Report No 20/2016*
  - [29] Messagie M 2017 Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles *Transp. Environ.* 1–14
  - [30] Hall D, Cui H and Lutsey N 2017 Electric vehicle capitals: Accelerating the global transition to electric drive
  - [31] ANFAC 2017 *Informe Vehículo alternativo 2017*
  - [32] Ajuntament de Barcelona 2018 *Estratègia de MOBILITAT ELÈCTRICA*
  - [33] ICAEN 2017 Punts de Recàrrega de Vehicle Elèctric a Catalunya (2017)
  - [34] Guide P U ADMS-Urban User Guide Version 4.1
  - [35] CERC ADMS-Urban. World leading urban air quality modelling software
  - [36] CERC 2017 Advanced Street Canyon Specification 1–19
  - [37] Carruthers D 2015 Developments of ADMS-Urban for complex urban environments : application to London and Hong Kong Presented by
  - [38] AMB 2017 Caracterització dels vehicles i les seves emissions a l'àrea metropolitana de Barcelona
  - [39] Barcelona S de M de 2017 Detall dels aforaments a Barcelona 2017
  - [40] Servei Meteorològic de Catalunya 2017 Taules de Dades de la Xarxa d' Estacions Meteorològiques Automàtiques *Anu. dades meteorològiques 2017*
  - [41] Hill N and Bates J 2020 Europe ' s Clean Mobility Outlook : Scenarios for the EU light-duty vehicle fleet , associated energy needs and emissions , 2020–50
  - [42] Àrea Metropolitana de Barcelona 2017 Programa metropolità de mesures contra la contaminació atmosfèrica
  - [43] Delft C 2018 Health impacts and costs of diesel emissions in the EU 72
  - [44] Project E S M 209AD EcoSense
  - [45] Instituto Nacional de Estadística 2017 Evolución del crecimiento anual de la población de España (2012-2016). **2016** 16
  - [46] Ajuntament de Barcelona 2016 Resum de resultats de població l'any 2016 1–8
  - [47] CE Delft, Infrac and Fraunhofer ISI 2011 External Costs of Transport in Europe Update Study for 2008 *CE Delft, INFRAS, Fraunhofer ISI* 161
  - [48] Barcelona A de 2018 Precio medio de venta en Barcelona (€/m2). 2001-2018.